

**UNIVERSIDAD DE CALDAS**  
**FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES**  
**MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA TIERRA**



**Análisis de la posible correlación entre los Límites de Atterberg y la resistencia a la compresión inconfiada de cenizas volcánicas típicas de los depósitos superficiales de suelos en Manizales, Colombia.**

**Karen Daniela Patiño López**

Manizales, Colombia

Noviembre, 2022

**Análisis de la posible correlación entre los Límites de Atterberg y la resistencia a la compresión inconfiada de cenizas volcánicas típicas de los depósitos superficiales de suelos en Manizales, Colombia.**

**Karen Daniela Patiño López**

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:  
**Magister en Ciencias de la Tierra**

Director:  
M.Sc. Álvaro Orlando Pedroza Rojas

Universidad de Caldas  
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales  
Maestría en Ciencias de la Tierra  
Manizales, Colombia

2022

## Resumen

En esta investigación exploratoria se analizó la posible tendencia correlacional entre los Límites de Atterberg y la resistencia a la compresión inconfina de las cenizas volcánicas depositadas superficialmente en la ciudad de Manizales, con miras a obtener una aproximación inicial, dado que no se tienen antecedentes de ecuaciones constitutivas al respecto.

La metodología consistió en un ejercicio de meta-análisis de 263 datos geotécnicos existentes sobre las cenizas volcánicas de Manizales, recuperados de 68 estudios realizados por consultores geotecnistas locales. La definición de la muestra incluyó la georeferenciación de los datos sobre el mapa de formaciones superficiales del municipio, la revisión detallada de los registros de perforación, y la verificación en campo.

Los datos se agruparon bajo distintos criterios (profundidad, clasificación en el Sistema Unificado – SUCS –, número de golpes del ensayo SPT y por barrios), y se plasmaron en diferentes gráficas, para buscar el grado de correlación de las variables mencionadas bajo herramientas de estadística descriptiva, obteniendo coeficientes de determinación  $R^2$  mayoritariamente bajos a muy bajos.

Los resultados obtenidos sugieren la necesidad de ahondar en el conocimiento previo sobre el comportamiento de los terrenos como sistema en un área geográfica determinada, evaluando las diversas interacciones de los elementos que lo integran (suelo, agua, ecomedio, etc), para mejorar la fiabilidad del estudio y proyección geotécnicos.

La mayoría de las correlaciones existentes entre variables geotécnicas son específicas para cada geomaterial y están influenciadas por distintos factores externos, cada uno con un grado de afectación específico. De ahí, que no resulta muy recomendable aplicar correlaciones generales preestablecidas y preferentemente es conveniente estructurar a partir de los datos de laboratorio disponibles, las correlaciones locales para cada material.

**Palabras clave:** Meta-análisis, investigación exploratoria, correlación geotécnica.

## **Abstract**

In this exploratory research, the possible correlational trend between the Atterberg Limits and the unconfined compressive strength of the volcanic ash deposited superficially in the city of Manizales was analyzed, with a view to obtaining an initial approximation, since there is no history of calculations. constitution in this regard.

The methodology consisted of a meta-analysis exercise of 263 existing geotechnical data on Manizales volcanic ash, retrieved from 68 studies carried out by local geotechnical consultants. The definition of the sample included the georeferencing of the data on the surface formations map of the municipality, the detailed review of the drilling records, and the verification in the field.

The data was grouped under different criteria (depth, classification in the Unified System - SUCS -, number of blows of the SPT test and by neighborhoods), and was reflected in different graphs, to find the degree of correlation of the variables mentioned under tools of descriptive statistics, obtaining coefficients of determination  $R^2$  mostly low to very low.

The results obtained suggest the need to delve into prior knowledge about the behavior of the land as a system in a given geographical area, evaluating the various interactions of the elements that make it up (soil, water, eco-environment, etc.), in order to improve reliability. of the geotechnical study and projection.

Most of the existing correlations between geotechnical variables are specific for each geomaterial and are influenced by different external factors, each one with a specific degree of affectation. Hence, it is not highly recommended to apply pre-established general correlations and it is preferable to structure the local correlations for each material based on the available laboratory data.

**Keywords:** Meta-analysis, exploratory research, geotechnical correlation.

# Tabla de contenido

## Resumen

## Abstract

<b>1. Introducción .....</b>	<b>1</b>
1.1    Objetivos.....	3
1.1.1    Objetivo general.....	3
1.1.2    Objetivos específicos .....	3
<b>2. Marco geológico .....</b>	<b>5</b>
<b>3. Fundamento teórico .....</b>	<b>9</b>
3.1    Características descriptivas de las cenizas volcánicas del Viejo Caldas .....	11
3.2    Propiedades geotécnicas de los suelos.....	14
3.2.1    Límites de Atterberg.....	15
3.2.1.1    Límite Líquido.....	18
3.2.1.2    Límite Plástico.....	19
3.2.1.3    Índice de Plasticidad.....	20
3.2.1.4    Carta de Plasticidad de Casagrande.....	20
3.2.1.5    Correlaciones a partir de Límite Líquido, Límite Plástico y/o Índice de Plasticidad.....	22
3.2.2    Resistencia al esfuerzo cortante .....	26
3.2.2.1    Pruebas de laboratorio para determinar la resistencia al esfuerzo cortante	28
3.2.2.1.1    Pruebas de resistencia a la compresión inconfínada (RCI).....	29
3.2.2.2    Correlaciones a partir de la resistencia a la compresión inconfínada....	32
3.2.3    Propiedades índice en suelos derivados de ceniza volcánica.....	34
<b>4. Metodología .....</b>	<b>37</b>
4.1    Tipo de investigación.....	37
4.2    Población y muestra.....	37
4.2.1    Población.....	37
4.2.2    Muestra .....	37
4.3    Recopilación de información .....	39
4.3.1    Bases de datos.....	40

4.4	Verificación en campo .....	42
4.5	Interpretación de datos de laboratorio.....	43
<b>5.</b>	<b>Resultados .....</b>	<b>44</b>
5.1	Descripción de muestras evidenciadas en la verificación en campo .....	46
5.2	Caracterización de suelos con base en pruebas de laboratorio .....	58
5.2.1.1	Contenido de humedad – W <sub>n</sub> (%) .....	59
5.2.1.2	Porcentaje de finos (PT200) .....	59
5.2.1.3	Límites de Atterberg.....	60
5.2.1.3.1	Correlaciones a partir de Límites de Atterberg .....	62
5.2.1.4	Carta de plasticidad de Casagrande .....	63
5.2.1.5	Resistencia a la compresión inconfiada.....	65
5.3	Zonificación de datos y cartografía en carta de Plasticidad de Casagrande .....	65
5.3.1	Criterio: Profundidad de extracción de la muestra .....	65
5.3.1.1	Muestras de cero a tres metros de profundidad .....	66
5.3.2	Criterio: Clasificación en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y resistencia a la compresión inconfiada.....	73
5.3.2.1	Limos de alta compresibilidad (MH).....	73
5.3.2.2	Arenas limosas (SM) .....	82
5.3.3	Criterio: número de golpes en ensayo SPT.....	88
5.3.3.1	Muestras con N de campo entre 15 y 30 golpes .....	89
5.3.3.2	Muestras con N de campo superior a 30 golpes .....	96
<b>6.</b>	<b>Discusión .....</b>	<b>104</b>
6.1	Análisis de la caracterización de geomateriales en laboratorio y su verificación en campo .....	105
6.2	Correlación de datos zonificados según criterio de profundidad de procedencia de las muestras, clasificación SUCS, y N de campo en ensayo SPT .....	109
6.2.1	Minerales presentes en las cenizas volcánicas según propiedades índices de plasticidad .....	109
6.2.2	Correlación entre los Límites de Atterberg y la resistencia a la compresión inconfiada (RCI) .....	114
6.2.2.1	Correlación entre los Límites de Atterberg y la resistencia a la compresión inconfiada (RCI) con datos seleccionados por sectores del área urbana de Manizales .....	121
6.3	Discusión final .....	131

<b>7. Conclusiones .....</b>	<b>135</b>
7.1 Recomendaciones .....	139
<b>8. Referencias.....</b>	<b>142</b>
<b>Anexo 1 – Base de datos.....</b>	<b>147</b>
<b>Anexo 2 – Resultados de laboratorio.....</b>	<b>152</b>
<b>Anexo 3 – Resultados para muestras entre 3 y 21 metros de profundidad .....</b>	<b>160</b>
<b>Anexo 4 – Gráficas de dispersión y cálculo de correlación lineal por barrio.....</b>	<b>183</b>

## Lista de figuras

<b>Figura 1.</b> Localización general del área de estudio. Ubicación de Manizales en el .....	2
<b>Figura 2.</b> Volcanes cartografiados en Colombia, ubicados sobre mapa de Colombia.....	5
<b>Figura 3.</b> Distribución espacial de los suelos derivados de ceniza volcánica.....	6
<b>Figura 4.</b> Formaciones superficiales en el municipio de Manizales. Plano D-2D.....	7
<b>Figura 5.</b> Tamaño de cenizas volcánicas en el Sistema Unificado de Clasificación. ....	10
<b>Figura 6.</b> Esquema de los Límites de Atterberg.....	17
<b>Figura 7.</b> Prueba de Límite Líquido (Modificado de Das, 2001). ....	18
<b>Figura 8.</b> Prueba de Límite Plástico. Modificado de Blázquez, 2016. ....	20
<b>Figura 9.</b> Carta de Plasticidad de Casagrande (1911) Elaboración propia. ....	22
<b>Figura 10.</b> Carta de Plasticidad de Casagrande, modificada por Mitchell (1976 .....	23
<b>Figura 11.</b> Carta de Plasticidad de Casagrande, modificada por Wesley (2010 .....	24
<b>Figura 12.</b> Método gráfico para determinar Límite de Contracción .....	25
<b>Figura 13.</b> Esquema del equipo de prueba triaxial (Tomado de Das, 2001).....	29
<b>Figura 14.</b> Curva de esfuerzo normal vs deformación unitaria, derivada de datos.....	30
<b>Figura 15.</b> Prueba de compresión simple (Modificado de Das, 2001). ....	31
<b>Figura 16.</b> Mapa de formaciones superficiales de Manizales. Depósitos de caída.....	41
<b>Figura 17.</b> Sectorización de la ciudad, para efectos de análisis de visitas de campo. ....	43
<b>Figura 18.</b> Distribución espacial de los puntos de muestreo en el área urbana .....	44
<b>Figura 19.</b> Diagrama de distribución de los puntos de muestreo.....	45
<b>Figura 20.</b> Registro fotográfico de las visitas de campo realizadas al sector nororiental ...	47
<b>Figura 21.</b> Fragmentos de depósitos de caída piroclástica, embebidos en los llenos. ....	48
<b>Figura 22.</b> Registro fotográfico de la visita de reconocimiento al punto ubicado en .....	49
<b>Figura 23.</b> Registro fotográfico de puntos visitados en el barrio Milán, comuna.....	50
<b>Figura 24.</b> Sector aledaño a la cancha de Baja Suiza, comuna Ecoturístico cerro de oro, .50	
<b>Figura 25.</b> Corte de talud cercano a la fábrica de Mabe en el barrio Alta Suiza, donde ....	51
<b>Figura 26.</b> Depósito superficial de ceniza volcánica en la zona del Túnel de la 52 .....	52
<b>Figura 27.</b> Granos de ceniza embebidos en capa superficial de materia orgánica.....	53
<b>Figura 28.</b> Ceniza volcánica con tonalidad rojiza y alta plasticidad, localizada en.....	53
<b>Figura 29.</b> Ceniza volcánica de textura granular en zona de la Avenida Paralela .....	54

<b>Figura 30.</b> Ceniza volcánica en el barrio Asunción, de grano pequeño, con presencia.....	55
<b>Figura 31.</b> Presencia de lapilli en formación superficial cercana al barrio Asunción. ....	55
<b>Figura 32.</b> Afloramiento de Formación Casabianca en la comuna San José. ....	56
<b>Figura 33.</b> Diagrama de barras con los rangos de distribución de la humedad natural .....	59
<b>Figura 34.</b> Diagrama de la distribución de las muestras con respecto al porcentaje que....	60
<b>Figura 35.</b> Diagrama distribución de las muestras respecto al grado de compresibilidad. .	61
<b>Figura 36.</b> Estado de las muestras de suelo según su Índice de Liquidez.....	62
<b>Figura 37.</b> Ubicación de las muestras en la Carta de Plasticidad de Casagrande. ....	64
<b>Figura 38.</b> Distribución de muestras por rango de profundidad. ....	66
<b>Figura 39.</b> Gráfico de dispersión de las muestras entre cero y tres metros para Límite .....	69
<b>Figura 40.</b> Gráfico de dispersión para el área donde se concentra la mayoría .....	69
<b>Figura 41.</b> Gráfico de dispersión de las muestras entre cero y tres metros para Índice.....	70
<b>Figura 42.</b> Gráfico de dispersión para el área donde se concentra la mayoría .....	71
<b>Figura 43.</b> Carta de plasticidad de Casagrande modificada por Mitchell (1976) .....	72
<b>Figura 44.</b> Carta de plasticidad de Casagrande modificada por Wesley (1973, 2010).....	73
<b>Figura 45.</b> Gráfico de dispersión de las muestras clasificadas como limos de alta .....	78
<b>Figura 46.</b> Gráfico de dispersión de las muestras clasificadas como limos de alta .....	79
<b>Figura 47.</b> Gráfico de dispersión de las muestras clasificadas como limos de alta .....	80
<b>Figura 48.</b> Gráfico de dispersión de las muestras clasificadas como limos de alta .....	81
<b>Figura 49.</b> Carta de plasticidad de Casagrande modificada por Mitchell (1976) .....	81
<b>Figura 50.</b> Carta de plasticidad de Casagrande modificada por Wesley (1973, 2010).....	82
<b>Figura 51.</b> Gráfico de dispersión de las muestras clasificadas como arenas limosas .....	85
<b>Figura 52.</b> Gráfico de dispersión de las muestras clasificadas como arenas limosas .....	86
<b>Figura 53.</b> Gráfico de dispersión de las muestras clasificadas como arenas limosas.....	86
<b>Figura 54.</b> Carta de plasticidad de Casagrande modificada por Mitchell (1976) .....	87
<b>Figura 55.</b> Carta de plasticidad de Casagrande modificada por Wesley (1973, 2010).....	88
<b>Figura 56.</b> Gráfico de dispersión de las muestras con N campo entre 8 y 15 golpes, para 92	
<b>Figura 57.</b> Gráfico de dispersión de las muestras con N campo entre 8 y 15 golpes, y. ....	93
<b>Figura 58.</b> Gráfico de dispersión de las muestras con N campo entre 8 y 15 golpes, . ....	94
<b>Figura 59.</b> Carta de plasticidad de Casagrande modificada por Mitchell (1976) .....	95
<b>Figura 60.</b> Carta de plasticidad de Casagrande modificada por Wesley (1973, 2010).....	96

<b>Figura 61.</b> Gráfico de dispersión de las muestras con N de campo superior a 30 golpes, .99	
<b>Figura 62.</b> Gráfico de dispersión para el área donde se concentra la mayoría.....	100
<b>Figura 63.</b> Gráfico de dispersión de las muestras con N de campo superior a 30 g .....	101
<b>Figura 64.</b> Gráfico de dispersión de las muestras con N de campo superior a 30 g .....	101
<b>Figura 65.</b> Carta de plasticidad de Casagrande modificada por Mitchell (1976) .....	102
<b>Figura 66.</b> Carta de plasticidad de Casagrande modificada por Wesley (1973, 2010).....	103
<b>Figura 67.</b> Cantidad de muestras en cada una de las 12 zonas definidas para agrupar.....	121
<b>Figura 68.</b> Correlación IP vs. $Cu/\sigma'$ para las muestras procedentes del Barrio Suiza .....	128

## Lista de tablas

<b>Tabla 1.</b> Características del mineral alófana. ....	13
<b>Tabla 2.</b> Grado de plasticidad del suelo según Sowers & Sowers (1970). ....	20
<b>Tabla 3.</b> Límites de Atterberg para diferentes minerales de arcilla (Mitchel & Soga .....)	24
<b>Tabla 4.</b> Clasificación de suelos expansivos (NSR-10). ....	26
<b>Tabla 5.</b> Relación de la consistencia y resistencia a compresión simple (Das, 2001). ....	33
<b>Tabla 6.</b> Ecuaciones empíricas relacionadas con $C_u$ y $\sigma'_0$ (Das, 2012). ....	33
<b>Tabla 7.</b> Propiedades índices en suelos derivados de ceniza volcánica (Herrera, 2006). ...	34
<b>Tabla 8.</b> Niveles de confianza para calcular el tamaño de la muestra (Calle et al., 2014)..	38
<b>Tabla 9.</b> Identificación en campo de los diferentes tamaños volcánoclasticos de las .....)	56
<b>Tabla 10.</b> Rangos de Índice de Plasticidad para las muestras analizadas. ....	62
<b>Tabla 11.</b> Consistencia de las muestras de acuerdo con su resistencia a la compresión.....	65
<b>Tabla 12.</b> Límites de Atterberg y resistencia a la compresión inconfínada para muestras .	67
<b>Tabla 13.</b> Límites de Atterberg y resistencia a la compresión inconfínada para muestras.	74
<b>Tabla 14.</b> Límites de Atterberg y resistencia a la compresión inconfínada para muestras.	83
<b>Tabla 15.</b> Límites de Atterberg y resistencia a la compresión inconfínada para muestras	89
<b>Tabla 16.</b> Límites de Atterberg y resistencia a la compresión inconfínada para muestra.	97
<b>Tabla 17.</b> Propiedades índices en suelos derivados de ceniza volcánica (Herrera, 2006)	107
<b>Tabla 18.</b> Evaluación de potencial de expansión en función del valor promedio.....	108
<b>Tabla 19.</b> Evaluación de los posibles minerales de arcilla en las 293 muestras .....)	110
<b>Tabla 20.</b> Evaluación de los posibles minerales de arcilla en las 293 muestras .....)	110
<b>Tabla 21.</b> Evaluación de los posibles minerales de arcilla en las 293 muestras .....)	111
<b>Tabla 22.</b> Correlación lineal entre LL vs. $Q_u$ e IP vs. $Q_u$ en muestras de suelos .....)	115
<b>Tabla 23.</b> Correlación lineal entre LL vs. $Q_u$ e IP vs. $Q_u$ en muestras de suelos .....)	116
<b>Tabla 24.</b> Correlación lineal entre LL vs. $Q_u$ e IP vs. $Q_u$ en muestras de suelos .....)	117
<b>Tabla 25.</b> Síntesis de correlación no lineal entre Límite Líquido vs. $Q_u$ e Índice de .....)	118
<b>Tabla 26.</b> Valores de $R^2$ para tendencias lineal y polinomial entre variables LL vs $Q_u$ ...)	122
<b>Tabla 27.</b> Análisis de dispersión para los datos del barrio Alta Suiza – 41.....)	127
<b>Tabla 28.</b> Resumen de coeficiente $R^2$ obtenido para los barrios evaluados.....)	128

## 1. Introducción

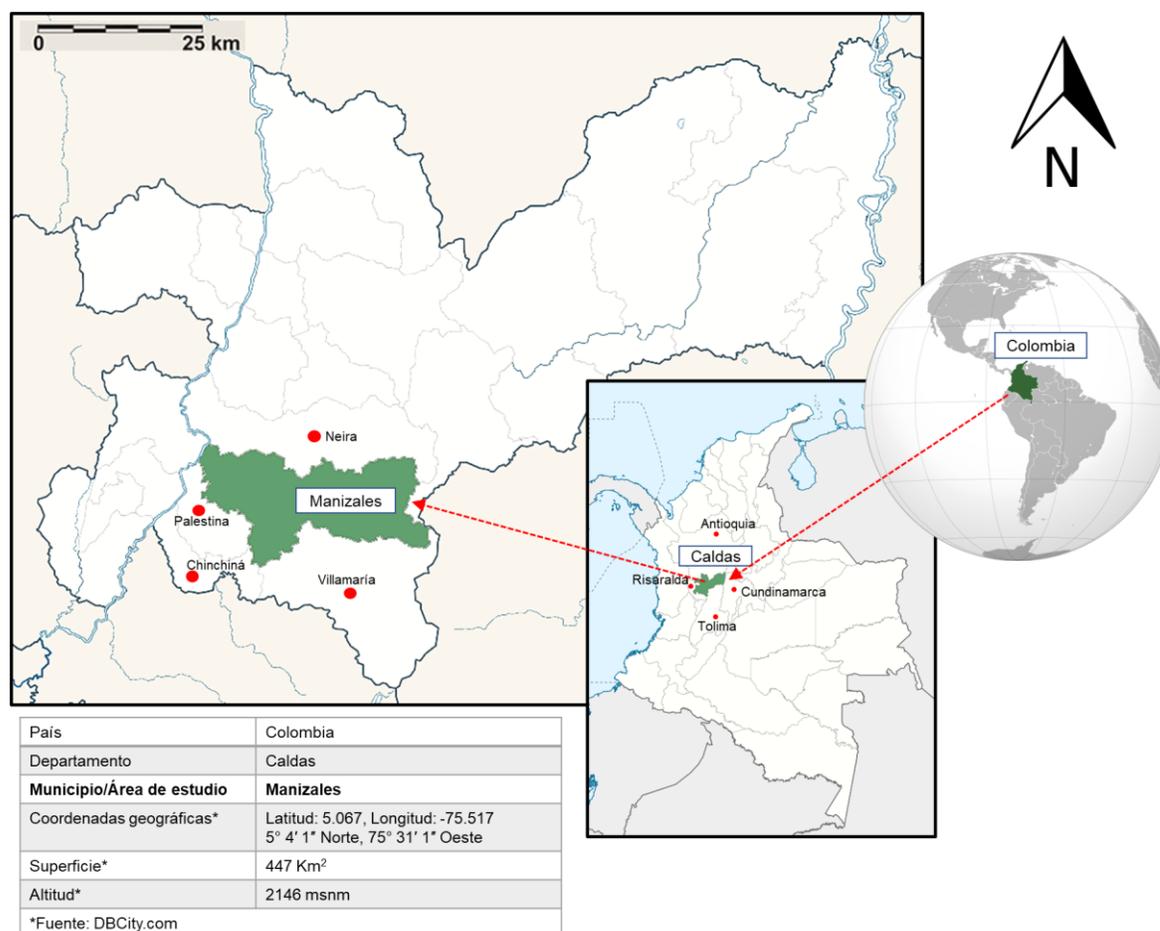
El conocimiento de la naturaleza, origen y comportamiento geomecánico de los geomateriales utilizados en el desarrollo de obras civiles o sobre los cuales se habrán de apoyar o ejecutar estas, es un requerimiento de primer orden en el contexto de una ingeniería preventiva y, en el marco de una política sustentable de gestión del riesgo.

Dada la amplia exposición de depósitos de ceniza volcánica sobre las cordilleras Central y Occidental de Colombia y, el registro de eventos de remoción en masa y fallas geotécnicas en proyectos de ingeniería, se aceptan como razonables los esfuerzos de los consultores e investigadores académicos en estudiar y caracterizar tales materiales, y de encontrar correlaciones entre las diferentes propiedades mecánicas y/o físicas de los mismos. De hecho, cerca del 12% del territorio colombiano está cubierto por depósitos derivados de ceniza (Lizcano et al., 2016), que yacen principalmente en su zona andina (centro y occidente), en cercanías del cinturón volcánico de Los Andes, localizado dentro del cinturón de fuego del Pacífico, en la zona donde convergen las placas Sudamericana, de Nazca y del Caribe.

El municipio de Manizales, capital del departamento de Caldas, ubicado en el centro-occidente de Colombia (Figura 1), se encuentra en el área de influencia de la Provincia Volcano-Tectónica San Diego – Cerro Machín (Martínez et al., 2014), que hace parte de la Zona Volcánica Norte de dicho cinturón de Los Andes (NVZ, Bourdon et al., 2002). Así, las formaciones superficiales predominantes en la región, consisten en depósitos de caída piroclástica provenientes de antiguas erupciones, y que están constituidos principalmente de ceniza volcánica (i.e. partículas menores a 2 mm), que puede llegar a alcanzar espesores hasta de 15 m (Aristizábal & Mendoza, 2017).

Diferentes autores señalan que la prevalencia de los problemas geotécnicos, incluidos los procesos de deslizamientos en dicha área de la geografía nacional, ocurren en los depósitos superficiales de ceniza volcánica existentes (e.g. Aristizábal & Mendoza, 2017; Lizcano et

al., 2016; CORPOCALDAS, 2016; IDEA, 2005); siendo tales fenómenos de remoción en masa, los eventos que conllevan el mayor número de pérdidas humanas y materiales en lo que va corrido del presente milenio (UNGRD, 2016).



**Figura 1.** Localización general del área de estudio. Ubicación de Manizales en el departamento de Caldas, Colombia.

El ejercicio de la Ingeniería Civil demanda del conocimiento geomecánico de los materiales térreos sobre los que se ejerce la geotecnia y/o se erigen las estructuras. Además de los resultados de pruebas de campo y laboratorio, una correcta selección de los parámetros es clave para evitar subestimar o sobreestimar los diseños, por cuanto el uso de datos no apropiados conduce a soluciones que no son pertinentes con las problemáticas que se estudian (Laporte, 2018), especialmente cuando se trata de suelos con dificultades de índole geotécnico, como las cenizas volcánicas, que requieren análisis diferentes a los convencionales (Lizcano et al., 2016).

Pese a la existencia de datos sobre propiedades índices, de clasificación y geomecánicas de las cenizas volcánicas típicas depositadas en predios del municipio de Manizales, no se observa en la literatura científica divulgada en el ámbito regional y/o nacional, antecedentes preponderantes sobre ecuaciones constitutivas entre las condiciones de plasticidad (calculadas a partir de los Límites de Atterberg, 1911) y la resistencia a la compresión inconfiada propias de estas cenizas, dos propiedades fundamentales en el estudio de los suelos finos cohesivos.

El presente trabajo propone expresiones de tendencia relacional enfocadas hacia la definición del campo de valores en los que puede caer la resistencia al corte no drenado y los parámetros de resistencia, a partir de los Límites de Atterberg en cenizas volcánicas típicas de los depósitos superficiales de suelos en Manizales. Este trabajo analiza e interpreta la información para predecir e identificar las relaciones existentes entre las distintas variables involucradas, al considerar que la discusión crítica de los resultados, constituye una herramienta útil para la toma de decisiones en los análisis geotécnicos preliminares, que son necesarios de hacer cuando se trabaja con el tipo de geomaterial aquí evaluado.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo general**

Analizar la posible correlación entre los Límites de Atterberg y la resistencia a la compresión inconfiada de cenizas volcánicas típicas de los depósitos superficiales de suelos en Manizales.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

- Describir las características geológicas de las cenizas volcánicas depositadas superficialmente en Manizales, a partir de información existente.
- Interpretar datos de laboratorio disponibles relativos a estudios geotécnicos de las cenizas volcánicas depositadas superficialmente en Manizales, haciendo énfasis en los Límites de Atterberg (LA) y la resistencia a la compresión inconfiada (RCI) de las cenizas volcánicas de Manizales.

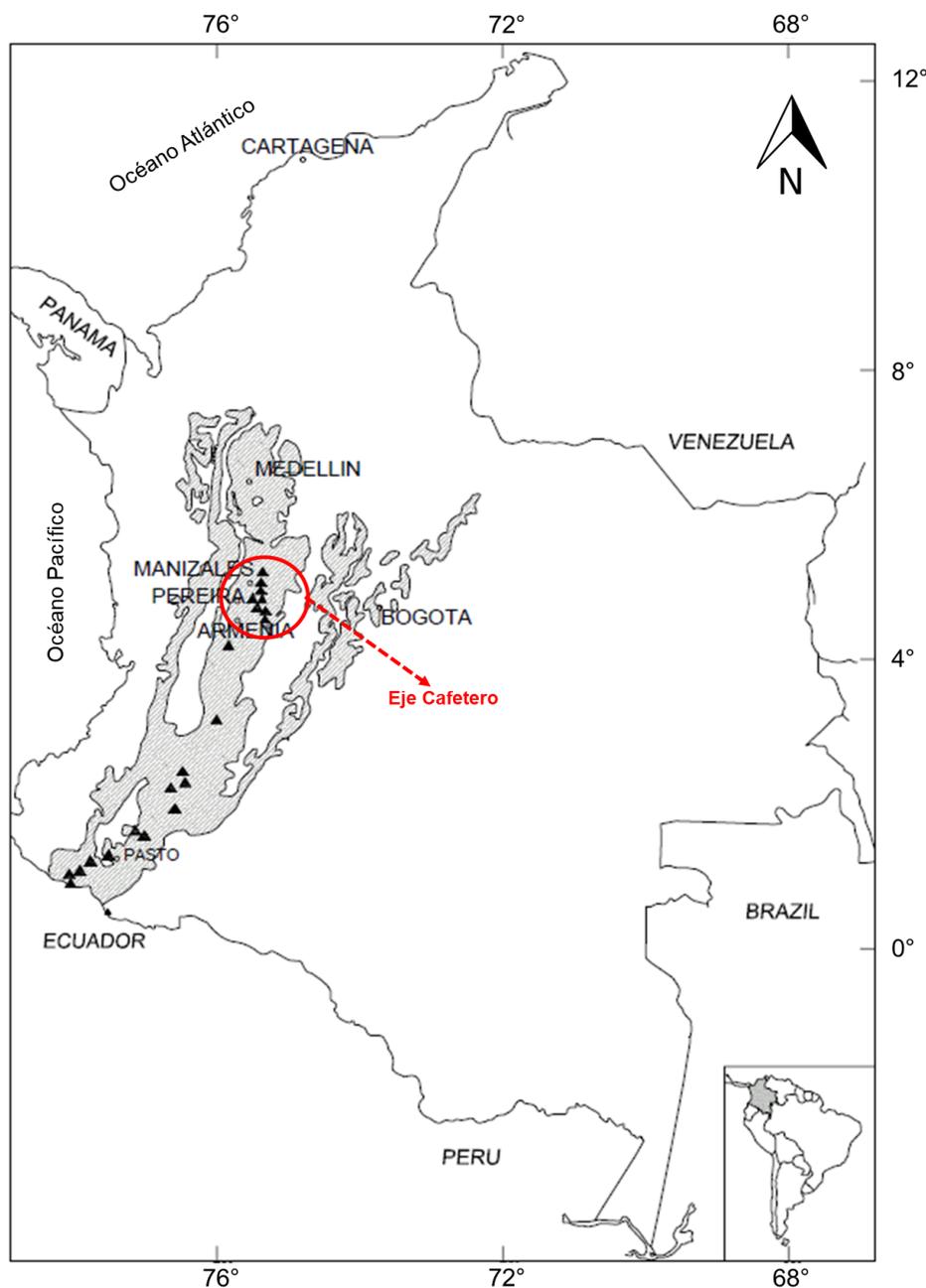
- Cartografiar por niveles de profundidad, los datos de LA y RCI en la Carta de Plasticidad de Casagrande modificada por Mitchell, incluyendo una ordenada de valores de RCI.
- Determinar la ecuación de correlación entre LA y RCI y su grado de resolución por niveles de profundidad, aplicando técnicas de regresión estadística.

## 2. Marco geológico

Desde la tectónica de placas se definen cinco zonas de cadenas volcánicas, ubicando a la costa Sudamericana dentro de la Zona Circumpacífica o Cinturón de Fuego del Pacífico (Ramírez & Murcia, 2016), en donde la subducción de la placa Nazca bajo la placa Sudamericana, ha dado origen a la cordillera de Los Andes. Ésta, se caracteriza por presentar una importante actividad volcánica, dentro de la cual se enmarcan al menos 38 volcanes en el territorio colombiano (Figura 2), cuyos procesos eruptivos han generado que cerca del 12% del territorio (especialmente el Eje Cafetero: Caldas, Risaralda, Quindío) esté cubierto por depósitos piroclásticos (Lizcano et al., 2016) (Figura 3).



**Figura 2.** Volcanes cartografiados en Colombia, ubicados sobre mapa de Colombia (SGC)

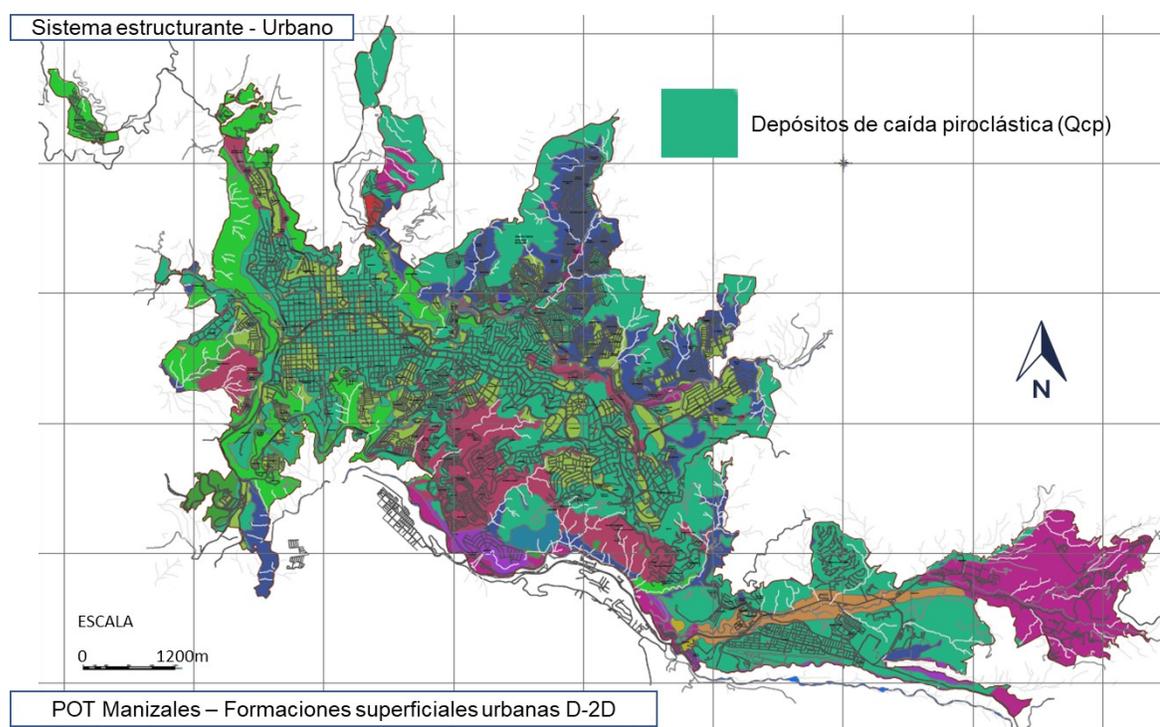


**Figura 3.** Distribución espacial de los suelos derivados de ceniza volcánica en Colombia (Lizcano et. al, 2016).

La municipalidad de Manizales, localizada en el sector occidental de la cordillera central de Colombia, a una altura media de 2150 msnm, presenta en gran parte de su territorio urbano una estratigrafía seriamente impactada por los mecanismos volcánicos prevalentes en la corona de la cordillera central (volcán del Tolima, Cisne, Santa Isabel, Ruiz, Cerrobravo, etc.); fuentes estas de eventos fluviovolcánicos y lluvias piroclásticas de cenizas y lapilli, que influyen en gran medida la región. La citada ciudad está emplazada sobre una paleo

zona de convergencia de placas litosféricas, caracterizada por alta actividad tectónica asociada al sistema de fallas de Romeral. En el casco urbano es posible identificar las siguientes unidades litológicas: Formación Quebradagrande, Formación Manizales, Formación Casabianca, Depósitos de Flujos de Escombros, Depósitos de Lluvia Piroclástica, Cinturones de Gabros y, algunos cuerpos subvolcánicos (Naranjo et al., 1989).

Las formaciones superficiales predominantes en Manizales corresponden a Depósitos de Caída Piroclástica (Qcp), que cubren aproximadamente 30% de su área urbana (POT, 2017 – 2031) (Figura 4). Este tipo de depósitos son generados por lluvia de fragmentos piroclásticos, originados tras erupciones volcánicas, y pueden ser acumulados por gravedad desde el tope de una columna eruptiva, o ser lanzados parabólicamente desde el volcán (cf. Murcia et al., 2013).



**Figura 4.** Formaciones superficiales en el municipio de Manizales. Plano D-2D. POT, 2017 – 2031.

Según Naranjo & Ríos (1989), la composición de los depósitos de caída piroclástica en Manizales, está dada por “una serie de fragmentos rotos de pómez y escoria de composición dacítica, así como de fragmentos de rocas (dacitas y andesitas porfídicas) de diferente tamaño que forman niveles de ceniza y lapilli”. Aguirre et al. (1993) mencionan que los

depósitos corresponden a materiales recientes que forman una secuencia estratigráfica no consolidada, constituida por cenizas, arenas volcánicas y pómez tamaño lapilli provenientes de la actividad explosiva del complejo volcánico Ruiz-Tolima (zona de volcanes destacados en la Figura 3).

Las dos unidades cuaternarias que componen dichos depósitos de caída piroclástica, pertenecen a (1) tobas volcánicas afectadas por la última glaciación (unidad más antigua), y (2) tefras (cenizas) que se encuentran estratificadas, no consolidadas, son de ambiente subaéreo, generalmente visibles, y en sus diferentes capas se alternan lapilli, arena volcánica y ceniza (Bernal et al., 2015).

El estado no consolidado de los depósitos, está formado por materiales como ceniza con lapilli y lapilli, de espesor promedio entre 10 y 15 m, cuya composición principal son anfíbol, feldespato, cuarzo, pómez y líticos que varían de tonalidad según su nivel de oxidación (gris, amarillo, café, rojizo) (Aristizábal & Mendoza, 2017).

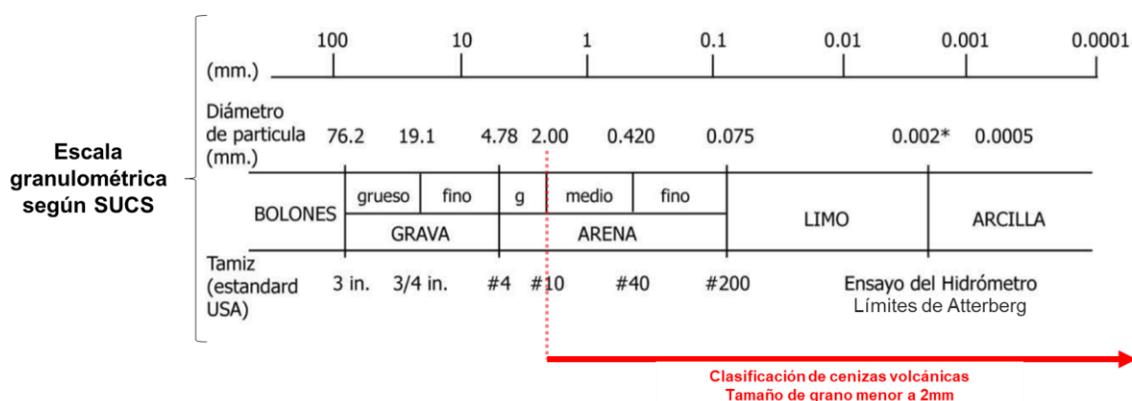
### 3. Fundamento teórico

De conformidad con el Título H de la Norma Sismo Resistente (NSR-10), código de construcción vigente en Colombia, las recomendaciones geotécnicas de diseño y construcciones civiles (excavaciones, rellenos, estructuras de contención, cimentaciones, etc.) se fundamentan en los hallazgos de la investigación del subsuelo y, en las características arquitectónicas y estructurales de las edificaciones.

La investigación del subsuelo conlleva el estudio de su origen geológico, la exploración del subsuelo mediante sondeos directos y técnicas geofísicas y, la ejecución de pruebas de campo y laboratorio que se requieran para identificar y clasificar los geomateriales encontrados (suelos, rocas y conglomerados), y cuantificar sus características físico-mecánicas. Finalmente, las recomendaciones geotécnicas están influenciadas por la interpretación técnica de los insumos proporcionados en la investigación del subsuelo (NSR-10).

En términos del código de construcción de Colombia, los suelos considerados son: los no cohesivos (o granulares) y, los no friccionantes (o cohesivos), caracterizados y clasificados en el marco del Sistema de Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), propuesto por Casagrande en 1942, y de uso común por parte de la ingeniería geotécnica, en el ámbito internacional (metodología utilizada en la norma ASTM) (Das, 2012). En el sistema de clasificación aquí nombrado, los dos grupos de suelos citados, son comúnmente referenciados como “suelos gruesos” y “suelos finos”; por ello, los estudios de caracterización incluyen la determinación granulométrica y, en especial la precisión del contenido de finos que pueda existir en una masa de suelo (porcentaje de partículas térreas con diámetro menor a 0,075 mm). La cualificación “suelo grueso” hace mención a las arenas y gravas, y la adjetivación de “suelo fino” es aplicada para arcillas y limos. En ese contexto, una muestra de suelo es considerada “fina” cuando más del 50% de esta pasa el tamiz #200 (Das, 2001).

La Figura 5 ilustra la clasificación textural de las partículas de suelo, donde las gravas corresponden a fragmentos pétreos que pasan el tamiz 3" y quedan retenidos en el tamiz #4 (hacen alusión a clastos con diámetro superior a 4,78mm e inferiores a 76,2mm); el término arena cubre las partículas que pasan el tamiz #4 (4,78mm) y son retenidas en el tamiz #200 (0,075mm). La identificación de la naturaleza del sedimento que pasa el tamiz #200 (0,075mm), se logra mediante la determinación de sus propiedades plásticas; esta información es obtenida de los Límites de Atterberg hallados a la fracción fina, a la cual se le puede establecer la distribución de tamaños en textura de limo y arcilla, mediante prueba de hidrómetro.



**Figura 5.** Tamaño de cenizas volcánicas en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). Modificado de Santamarina & Narsilio (2001).

El término “ceniza volcánica” se aplica para denominar la fracción de los depósitos volcanoclásticos con un tamaño de grano inferior a 2 mm, el cual corresponde al tamiz #10 (Murcia et al., 2008, y referencias allí citadas). En el marco del Sistema Unificado (Figura 5), las “cenizas volcánicas” cubren un amplio espectro de tamaños que corresponden a partículas denominadas “arena media”, “arena fina”, “limo” y “arcilla”. Esta descripción de textura de las cenizas volcánicas se usa para efectos de su caracterización geotécnica.

Las cenizas volcánicas son susceptibles de variar su morfología y textura durante el proceso de erupción – transporte – depositación. Los suelos residuales que provienen de cenizas volcánicas, se desarrollan por procesos de alteración física y química como disolución, lixiviación y precipitación de compuestos, que modifican la forma y tamaño de partículas, sus minerales y porosidad (Lizcano et al., 2006). Por tratarse de materiales cementados,

estos suelos residuales presentan estructuras internas con propiedades y comportamientos atípicos (Torres & Viveros, 2018).

El vidrio volcánico es el principal componente de las cenizas y, su descomposición da origen a minerales arcillosos (haloisita, alófana e imoglita), presentes en la fracción submicroscópica (Herrera, 2006) y, que son responsables de las características de plasticidad y compresibilidad de los suelos volcánicos (Das, 2012).

Los minerales presentes en las cenizas volcánicas, poseen ciertas propiedades (tamaño, forma, carga eléctrica, energía superficial, etc.) particulares con respecto a los comúnmente encontrados en suelos sedimentarios (Lizcano et al., 2006), marcando un comportamiento geomecánico especial cuando se encuentran en presencia de agua: capacidad alta de retención de agua, humedades naturales elevadas, bajas densidades secas, ángulos de fricción altos y cambios en su estructura según el tipo de secado empleado (Sanhueza et al., 2011).

### **3.1 Características descriptivas de las cenizas volcánicas del Viejo Caldas**

Arango J.D, 1993, muestra una clasificación de las cenizas volcánicas del eje cafetero, según características generales y comportamiento geomecánico. Este autor señala en su trabajo investigativo, que en la zona de Caldas se registran los siguientes suelos volcánicos:

- **Cenizas volcánicas procedentes de erupciones magmáticas.** En este grupo se encuentran:
  - a. Las controladas por el contenido de volátiles, la composición y la temperatura. Se asocian las cenizas de composición basáltica, formadas a partir de lava de baja viscosidad. Sus partículas son esferoidales u ovoidales, pequeñas, de vidrio.
  - b. Cenizas de composición silícica, generadas por flujos piroclásticos, explosiones de magma de baja viscosidad, de tipo traquíticos y dacíticos.
  - c. Cenizas de composición riolítica a andesítica, producto de grandes explosiones con magma de alta viscosidad y gran contenido de volátiles. Las de tipo andesítico poseen una mezcla de vidrio, cristales, y componentes líticos, con superficie frecuentemente irregular. Los fenocristales erupcionados son convertidos en

cristales constitutivos de las cenizas. Las cenizas de tipo riolítica se componen de pumitas pulverizadas (grano fino), fenocristales individuales, derivados de la fragmentación de la pumita y partículas líticas.

- d. Cenizas volcánicas carbonatadas. Son escasas pero las existentes tienen alta concentración de carbonatos de sodio, y se caracterizan por estar revestidas de cristales en forma de tallo.
- **Cenizas procedentes de erupciones freatomagmáticas.** Se forman al entrar en contacto el magma con el agua, dando origen a un fluido inestable y generando una onda que fragmenta el material. La textura (tamaño de la partícula) es dependiente de la magnitud de la explosión, la cual determina los diferentes tipos de depósitos y, por ende, los diversos modos de dispersión. El tamaño de las partículas es inversamente proporcional al tamaño de la explosión. Las partículas volcánicas poseen forma de bloque con superficies curvoplanares, usualmente encontradas en ángulo recto, con escasez de vesículas.
  - **Cenizas volcánicas de conos litorales.** Producidas al ser atrapado el vapor bajo la corteza de flujos de lava, generando explosiones.
  - **Cenizas volcánicas de erupciones freáticas.** Se generan en gran cantidad en sistemas hidrotermales. Son fragmentos minerales subangulares, embebidos en matriz de arcilla y fragmentos líticos alterados.

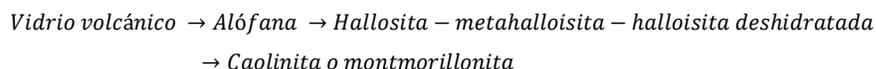
Respecto de la evolución de los procesos de meteorización de los suelos volcánicos en Colombia, el IGAC (1995) los presenta como “andolización” y asocia a tales procesos los siguientes tipos de suelos: “Melanudands”, “Hapludands”, “Fulvudands”, “Melanoborands” y “Placudands”.

De acuerdo con el IGAC, los “Andosoles Alofánicos” generados evolucionan hacia la creación de alófana/imogolita y humus. En Colombia, hay predominio de alófana tipo B, y los materiales alofánicos dominan sobre la presencia de halloisita, gibsitita, imogolita y caolinita.

La edad y la composición mineralógica de las cenizas volcánicas, sugieren cómo han avanzado los procesos de meteorización en estas. La corta edad geológica de las cenizas

volcánicas (menor a 10.000 años), explica que no hayan alcanzado estados avanzados de meteorización, significando que el único mineral que ha desarrollado un proceso de meteorización en los suelos de ceniza volcánica en el Viejo Caldas es el vidrio volcánico. La rápida meteorización que ocurre en este mineral es el punto de partida para la formación de nuevos minerales en las cenizas volcánicas.

Para Arango J.D. (1993), en el Viejo Caldas (considerado ambiente húmedo), al no encontrarse presente el mineral gibsita, y al ser arrastradas las sales solubles por medio de lixiviación rompiendo los ligamentos de sílice, el vidrio volcánico presente en las cenizas volcánicas puede seguir este modelo de meteorización:



Según el mencionado autor, en la zona del Viejo Caldas, el mineral alófana es más abundante en los horizontes más superficiales, mientras que la hallosita abunda a mayores profundidades, debido a la existencia de mayores humedades en niveles más enterrados, condición básica para que se genere la hallosita a partir de la meteorización de la alófana.

La meteorización de las cenizas volcánicas conlleva a la formación de mezclas que pueden incluir alófana, vidrio, imogolita, halosita, sílice, opalina, caolinita y los llamados sesquihidróxidos, entre otros minerales. Su principal constituyente es el mineral amorfo denominado alófana, derivado de la meteorización de los vidrios volcánicos y plagioclasas. La importancia de los materiales amorfos radica en su participación en la creación de puentes de unión entre los minerales, constituyendo estos materiales y la sílica amorfa en particular, que aporta cohesión y ayuda a definir la estructura de las cenizas volcánicas. En la Tabla 1 se presentan las características típicas de la alófana.

**Tabla 1.** Características del mineral alófana.

Tomado de <https://mineralesweb.es/silicat/alofana.htm>; <https://minerales.webnode.es/alofanita/>

Descripción	Hidrosilicato de aluminio amorfo, del grupo de los filosilicatos. Composición química muy variable. De alta porosidad, alta capacidad de intercambio catiónico y aniónico, alta capacidad de absorción de agua y una muy grande superficie específica, lo cual le confiere alta actividad química, con capacidad de presentar cambios volumétricos irreversibles (Mitchell y Coutinho, 1991).	
-------------	---	---

	En estado seco, tales unidades esféricas están unidas formando “micro agregados”, estructura típica de estos materiales observables en el campo. El secado remueve el agua absorbida, facilitando la unión de partículas individuales y el surgimiento de grumos (Kitawa).
Sistemática	Formula química: $Al_2SiO_5 \cdot nH_2O$ Clase: Silicatos. Subclase: Filosilicatos
Óptica	Carácter: Isótropo. Índice de refracción: $n_1: 1.47-1.51$ .
Física	Color: Incolora, blanca a diversas coloraciones. Raya: Blanca. Brillo: Vítreo, céreo, resinoso o craso. Diafanidad: Transparente a traslúcida. Fusibilidad: Infusible. $F = 7$ . Exfoliación: No presenta. Fractura: Concoidea a desigual. Tenacidad: Frágil. Dureza: 2.0 - 3.0. Densidad: 1.8 - 2.1. (pura 1.9). Hábito: Masas reniformes, estalactíticas y costras. Concreciones pulverulentas.
Cristalografía	Sistema Cristalino: Amorfo.
Observaciones	Impurezas: Fe, Cu, Zn, P, Mg, Cr (miloschita), Ca, Ti, Na, K. Solubilidad: En CIH Paragénesis: Crisocola, haloisita, casiterita, galena, cuarzo y minerales del grupo de la caolinita. Caracterización: Desprende agua en tubo cerrado. Descompone al soplete sin fundir. Luminiscencia blanca, crema, verde o parda amarillenta. Origen: Producto de la alteración de silicatos. Aparece en ciertos sedimentos arcillosos. Observaciones: Se carbonata por la acción de las aguas carbonatadas.
Aplicaciones	Mineral de interés científico y coleccionista.

Usualmente, las cenizas volcánicas presentan texturas porosas, el vidrio volcánico y sus derivados (sílica gel) están presentes como cementantes de las partículas, y el mineral cementante modifica las características físicas de las cenizas, al aportarle al suelo volcánico un incremento en su resistencia. Consecuentemente, la resistencia del suelo volcánico está representada por la resistencia que proporciona el esqueleto de este más la resistencia aportada por el cementante.

### 3.2 Propiedades geotécnicas de los suelos

La regulación de los procedimientos para determinar las propiedades geotécnicas de los suelos está consagrada en la Norma de la Sociedad Americana para Ensayos y Materiales (American Society for Testing and Materials - ASTM), adaptada en la Norma Técnica Colombiana (NTC) del Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC) y, adoptada, tanto por la ingeniería nacional como en los decretos que rigen la construcción de obras civiles en Colombia, incluida la NSR-10.

Un estudio geotécnico clásico, al tenor de lo consagrado en la NSR-10, debe incluir como mínimo, las llamadas pruebas básicas de laboratorio, a saber: peso unitario, humedad y clasificación completa (que conlleva la ejecución de ensayos de granulometría y Límites de Atterberg) para cada una de las unidades estratigráficas y sus distintos niveles de meteorización. Así mismo, deben ser determinadas las propiedades de resistencia en cada uno de los geomateriales encontrados en el sitio, mediante ensayos de compresión simple o corte directo en suelos cohesivos, y corte directo o SPT en suelos granulares.

Un estudio geotécnico detallado exige la determinación de las propiedades mecánicas e hidráulicas del subsuelo (resistencia al cortante, propiedades esfuerzo-deformación, compresibilidad, expansión, permeabilidad y otras que sean necesarias), según el propósito del estudio y la naturaleza del proyecto que va a hacer uso de la información geotécnica evaluada (NSR-10).

### **3.2.1 Límites de Atterberg**

El científico sueco Albert Atterberg (1911), definió la plasticidad como la capacidad que tiene un suelo de ser deformado sin agrietarse, ni producir rebote elástico. Este investigador fue el primero en observar que los suelos arcillosos, en condiciones húmedas, son plásticos y en condiciones secas se vuelven muy duros (Blázquez, 2016). La existencia de minerales de arcilla en suelos de grano fino, permite que este sea remodelado sin desmoronarse, en presencia de cierto contenido de humedad (Das, 2001).

Los suelos finos exhiben plasticidad al tener mineral de arcilla en su composición. Siendo la humedad natural una propiedad de estado, dependiente de las condiciones climatológicas y de la naturaleza del suelo, la consistencia de una arcilla variará según los cambios en el contenido de humedad natural (o sea, la resistencia del suelo arcilloso a ser deformado o amasado, remodelado o roto).

Los Límites de Atterberg son, en esencia, contenidos de humedad que representan límites de consistencia; consecuentemente, el rango de continuo de humedad entre dos de tales valores límite, define un estado de consistencia en el cual se tiene un determinado comportamiento mecánico de la arcilla. Pese a que Atterberg definió seis (6) estados límite:

pegajosidad, adhesión, cohesión, contracción, plástico, líquido, sólo los tres últimos han sido ampliamente aplicados en geotecnia (ASTM D4318-17).

Etimológicamente, la consistencia es la capacidad de mantener las partes del conjunto integradas; por consiguiente, equivale a estabilidad y coherencia. En geotecnia, el término consistencia solo se aplica para suelos finos que, dependiendo del contenido de agua y su mineralogía, fluyen sin romperse.

Establecidos los Límites de Atterberg, el contenido de humedad se convierte en un indicador de consistencia de la arcilla, dependiendo del rango de humedad en que se ubique. El rango de humedad comprendido entre cero (0) y el Límite de Contracción, identifica una consistencia sólida o rígida de la arcilla. El rango de humedad entre Límite de Contracción y Límite Plástico, sugiere un comportamiento semisólido o semirrígido. El rango de humedad entre Límite Plástico y Límite Líquido, corresponde al estado plástico del geomaterial arcilloso y, es en esta condición en que la arcilla resulta moldeable. A este rango de humedad se le conoce como el dominio del Índice de Plasticidad de una arcilla y queda definido por la resta entre los dos Límites de Atterberg que lo determinan ( $LL - LP$ ).

La plasticidad de un suelo se atribuye a la deformación de la capa de agua adsorbida alrededor de los minerales, desplazándose como sustancia viscosa a lo largo de la superficie mineral, controlada por la atracción iónica. La plasticidad en las arcillas es alta, por su forma aplanada (lentejas) y pequeño tamaño, y a su vez, la plasticidad del suelo dependerá del contenido de arcilla. Skempton (1953) expresó esta relación matemáticamente, con la actividad ( $A$ ) de la arcilla (Ecuación 1):

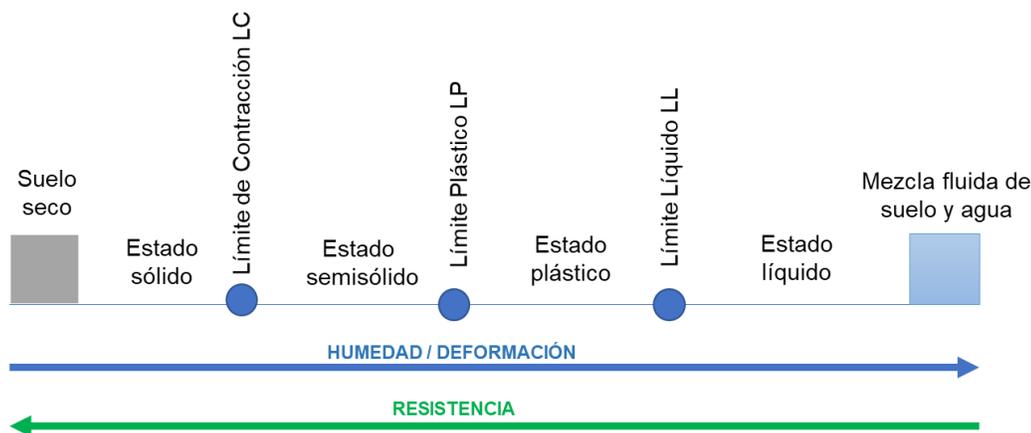
$$A = \frac{IP}{\% \text{ de arcilla}} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

% de arcilla = porcentaje en peso de suelo, de partículas menores a 2 micras.

Finalmente, las arcillas exhibirán un comportamiento de fluido viscoso, cuando la humedad natural supera al Límite Líquido. La humedad por debajo de la cual un suelo fino plástico abandona el rango de plasticidad es el Límite Plástico y, la humedad por encima de la cual

un suelo fino plástico abandona el rango de plasticidad, es el Límite Líquido. El Límite de Contracción es la humedad por debajo de la cual, un suelo no experimenta cambios de volumen (Figura 6) (Osorio, 2010).



**Figura 6.** Esquema de los Límites de Atterberg.

Si el contenido de humedad del suelo es inferior al Límite de Contracción, el suelo tendrá una consistencia rígida y adoptará un comportamiento frágil; por consiguiente, tenderá a romperse preferentemente que deformarse; si el contenido de humedad se encuentra en el rango de plasticidad (definido por los Límites Plástico y Líquido), el suelo será moldeable, y si el contenido de humedad supera al Límite Líquido, el suelo tendrá una consistencia de fluido viscoso y perderá su resistencia al esfuerzo cortante (Blázquez, 2016).

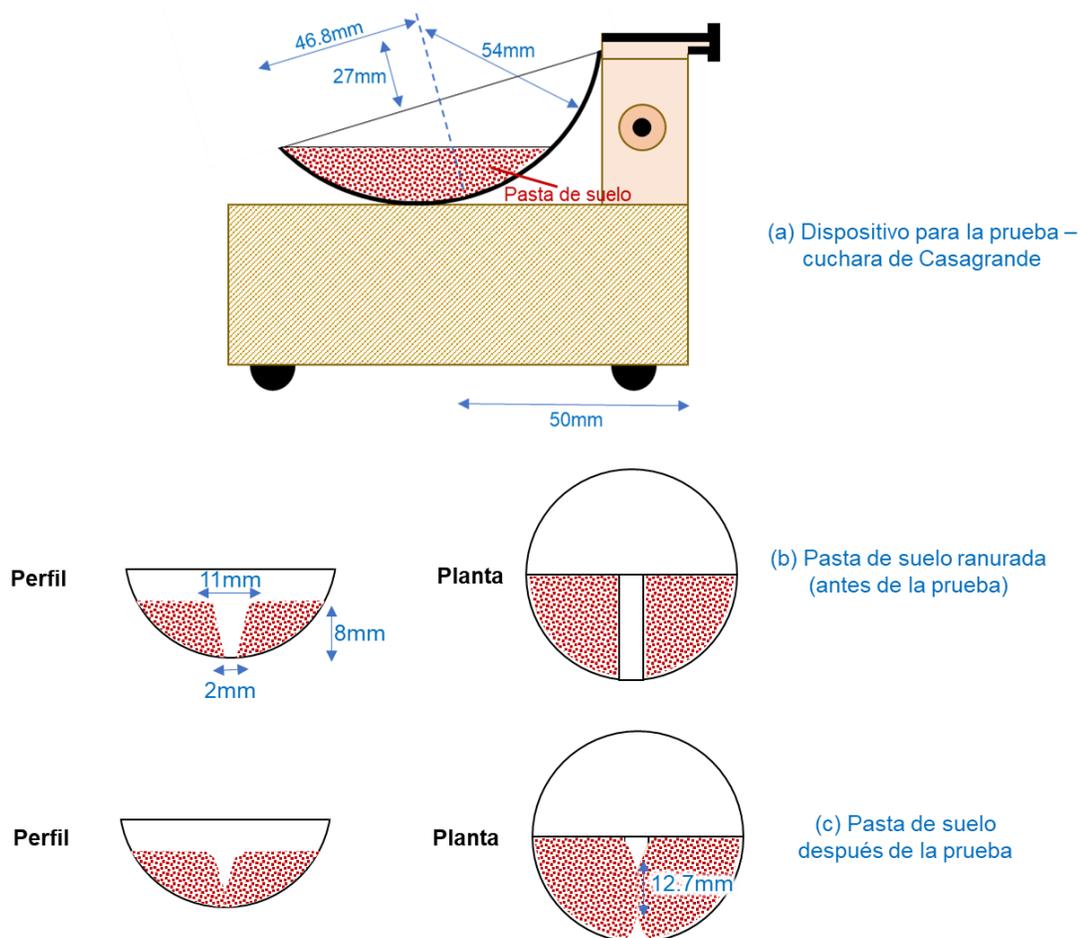
Al crecer el contenido de humedad de un suelo fino que exhiba plasticidad, decrece la consistencia del suelo (se reduce su resistencia al corte) o viceversa, al perder humedad un suelo fino, aumentará su resistencia mecánica. Lo anterior indica que es importante saber si el suelo aumenta o reduce su humedad, para saber si pierde o gana consistencia y, por otra parte, que la consistencia es, igualmente, una propiedad de estado, dependiente del contenido de humedad del suelo fino.

La identificación y clasificación de un suelo fino se basa en la interpretación de la pareja ordenada de valores (LL, IP) característicos del geomaterial. De ahí, la importancia de conocer el Límite Líquido e Índice de Plasticidad del suelo, por cuanto hace posible emitir un juicio sobre el tipo de material al que corresponde la fracción fina (Blázquez, 2016). De conformidad con la norma internacional ASTM D4318, los procedimientos de laboratorio

para la obtención del porcentaje de humedad equivalente al Límite Líquido, Límite Plástico e Índice de Plasticidad, son los siguientes:

### 3.2.1.1 Límite Líquido

Se realiza a la fracción fina que pasa el tamiz No.40 ( $425\ \mu\text{m}$ ). Se prepara una mezcla suelo-agua, a manera de pasta, la cual es situada en la cazuela de Casagrande, y utilizando el ranurador patronado del equipo, se divide la muestra por su mitad. Posteriormente, se levanta y deja caer la cazuela, a una altura de un (1) cm, mediante un dispositivo de palanca. El golpeteo repetitivo de la cazuela contra la base del equipo, hará que las dos mitades en que fue dividida la pasta suelo-agua dentro de la cazuela, tiendan a juntarse. Se contabiliza el número de golpes necesarios para hacer cerrar la abertura prefabricada, una distancia aproximada de 1,3 cm (Figura 7).



**Figura 7.** Prueba de Límite Líquido (Modificado de Das, 2001).

La norma presenta dos métodos, uno de los cuales puede resultar no aplicable a todo tipo de suelos. Se recomienda determinar el Límite Líquido repitiendo tres veces el proceso enunciado en el párrafo anterior (para rangos de golpes entre 10 y 35). De cada ejercicio, concluido el cierre de la ranura, se toma una muestra de la pasta, para determinación del contenido de humedad de esta. Los resultados del ensayo (número de golpes, contenido de humedad) se grafican en papel semilogarítmico, (contenido de agua en las ordenadas, a escala aritmética y, número de golpes en la abscisa, a escala logarítmica). El Límite Líquido es la humedad que corresponde a 25 golpes en dicho gráfico.

Los detalles del ensayo están consagrados en la Norma Técnica Colombiana (NTC) 1494.

### **3.2.1.2 Límite Plástico**

Es el contenido de humedad determinado con una fracción de la pasta suelo-agua utilizada para calcular el Límite Líquido, la cual es ensayada cuando se ha reducido su contenido de agua hasta un punto en que rueda sin pegarse a la superficie. Alcanzado el nivel de consistencia deseado, la prueba consiste en rodar aproximadamente 2 gr de la muestra sobre una placa de vidrio (ejerciendo presión con el dedo), hasta obtener un hilo de suelo con diámetro de 3,2 mm (Figura 8 - a). Alcanzada esta medida, se fracciona el hilo, se vuelven a unir las partes, y se repite el proceso hasta que el hilo de 3,2 mm (o más), se derrumbe bajo la presión de la mano y no sea posible volverlo a remoldear (Figura 8 - b). Finalizado este ejercicio, las partes de suelo ensayado son llevadas al horno, para su secado y posterior cálculo de humedad. El porcentaje de humedad que contiene el suelo en este punto, se conoce como su valor de Límite Plástico.

Los detalles del ensayo se encuentran consignados en la Norma Técnica Colombiana (NTC) 1493.

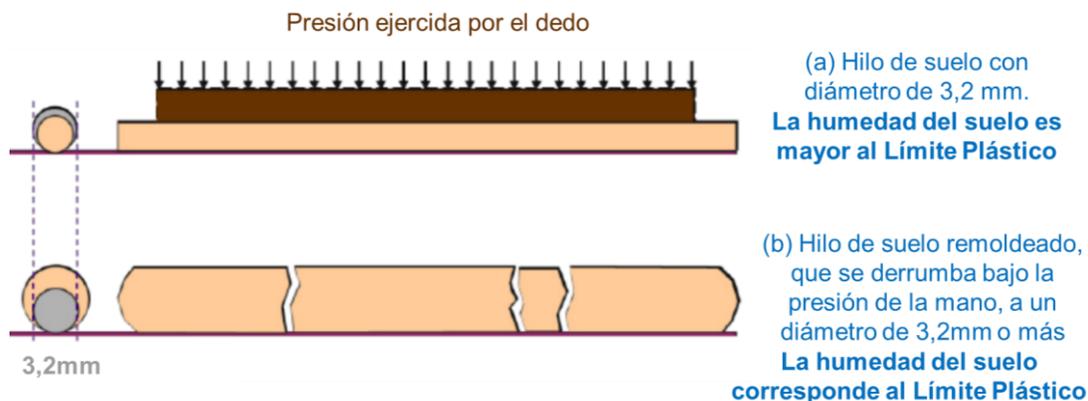


Figura 8. Prueba de Límite Plástico. Modificado de Blázquez, 2016.

### 3.2.1.3 Índice de Plasticidad

Está definido por la diferencia entre el Límite Líquido y el Límite Plástico del suelo (Ecuación 2).

$$IP (\%) = LL - LP \quad \text{Ecuación 2}$$

Atterberg describió este índice como la magnitud del intervalo de humedades en el cual el suelo posee una consistencia plástica, y concluyó que representa una medida satisfactoria de su grado de plasticidad (Puy, 2005). La Tabla 2 presenta los rangos propuestos por Sowers (1979), para cualificar la plasticidad del suelo en función de su Índice de Plasticidad.

Tabla 2. Grado de plasticidad del suelo según Sowers & Sowers (1970).

Índice de Plasticidad, IP (%)	Descripción
0 - 3	No plástico
3 - 15	Ligeramente plástico
15 - 30	Baja plasticidad
> 30	Alta plasticidad

### 3.2.1.4 Carta de Plasticidad de Casagrande

Arthur Casagrande, ingeniero civil de origen austríaco, propuso la utilización del Límite Líquido (LL) y del Índice de Plasticidad (IP) para clasificar suelos finos en términos de su compresibilidad, entendida como el grado en que una masa de suelo disminuye de volumen cuando se aplican cargas sobre ella. Para tal propósito, ideó la Carta de Plasticidad, que corresponde al primer cuadrante de un plano cartesiano definido por el Límite Líquido en las abscisas y, el Índice de Plasticidad en las ordenadas. Este cuadrante del plano es

subdividido en seis (6) áreas, con un sistema de tres rectas intersecantes (Líneas A, B y U) y, dos rectas paralelas:

- La Línea B es una línea recta vertical, correspondiente a un Límite Líquido de 50%, que divide la carta en dos regiones: alta compresibilidad (que conlleva el símbolo “H”) a su derecha, y baja compresibilidad (representada por el símbolo “L”) a su izquierda.
- La línea inclinada llamada Línea A, sectoriza los suelos finos como arcillas (C) si se encuentran por encima de ella, o limos (M) y sedimentos orgánicos (O), si están bajo la misma (Ecuación 3).

$$IP = 0,73 * (LL - 20) \quad \text{Ecuación 3}$$

- De acuerdo con las investigaciones de Casagrande, todos los suelos encontrados están situados por debajo de la Línea U (Blázquez, 2016), siendo esta el umbral superior de la carta para clasificar suelos finos (Ecuación 4).

$$IP = 0,9 * (LL - 8) \quad \text{Ecuación 4}$$

- Las rectas paralelas se trazan en los valores  $IP = 4\%$  e  $IP = 7\%$ , encerrando entre la Línea A y Línea U, un área dentro de la cual se identifican los suelos finos de transición, conocidos como mezclas combinadas de finos de baja compresibilidad (CL-ML).

La información proporcionada en la Carta de Plasticidad es de gran valor y es la base para la clasificación de los suelos de grano fino en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (Das, 2001). La Figura 9 muestra las zonas definidas por las rectas previamente descritas, y dentro de cada una de ellas se indican los símbolos para los suelos finos correspondientes.

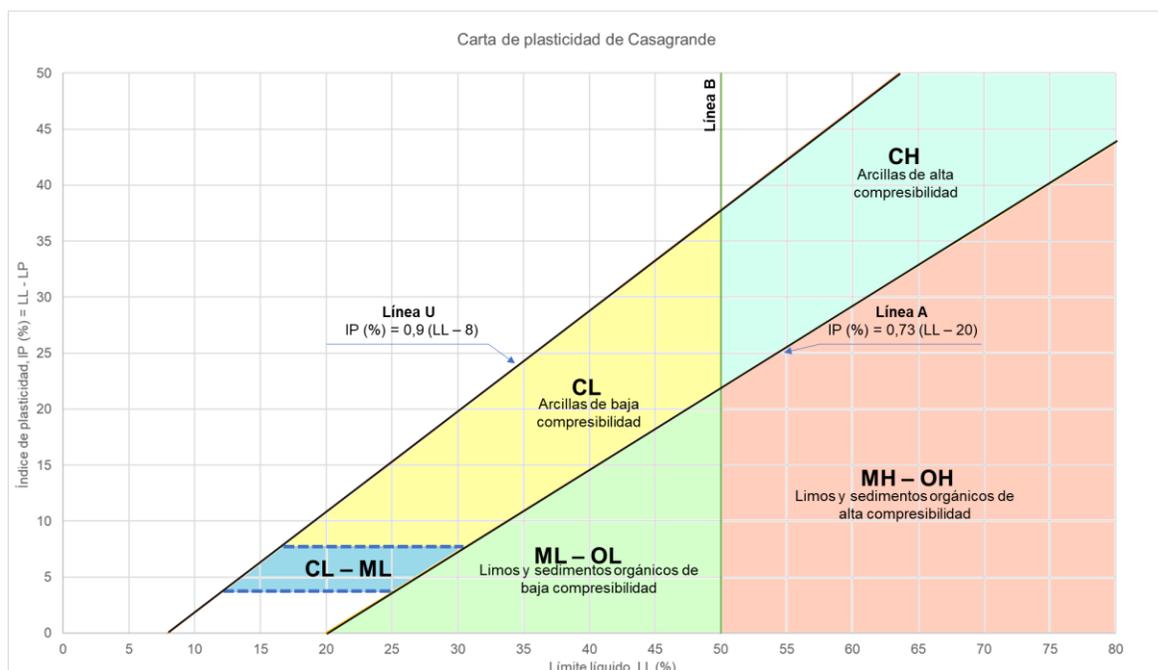


Figura 9. Carta de Plasticidad de Casagrande (1911). Elaboración propia.

### 3.2.1.5 Correlaciones a partir de Límite Líquido, Límite Plástico y/o Índice de Plasticidad

**Índice de Liquidez (IL).** Es la relación agua-plasticidad, que mide a escala, el contenido de humedad natural de una muestra de suelo, respecto de su Límite Líquido y Límite Plástico (Ecuación 5). Este índice es una medida indirecta y aproximada, de la resistencia del material.

$$IL = \frac{w-LP}{LL-LP} \quad \text{Ecuación 5}$$

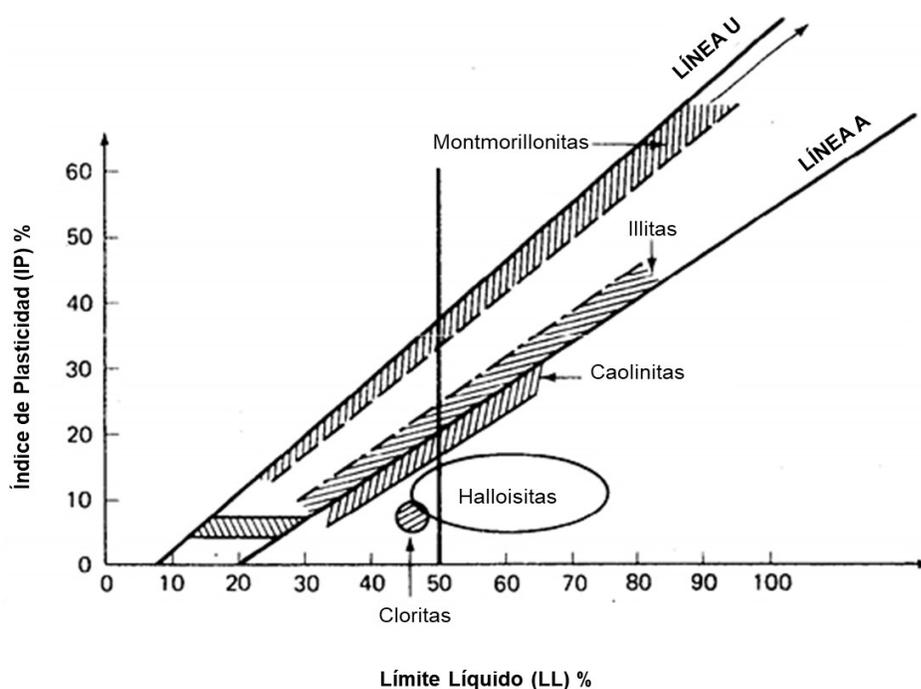
Donde

$w$  = contenido de agua del suelo in situ. (en porcentaje).

Un valor del Índice de Liquidez cercano a 1, sugiere que la humedad en el campo es igual o cercana al Límite Líquido, y significa que el suelo está subconsolidado a normalmente consolidado. Si el Índice de Liquidez es cero o menor a cero, muestra a un suelo fuertemente sobreconsolidado, y revela que la humedad natural en campo es cercana al Límite Plástico.

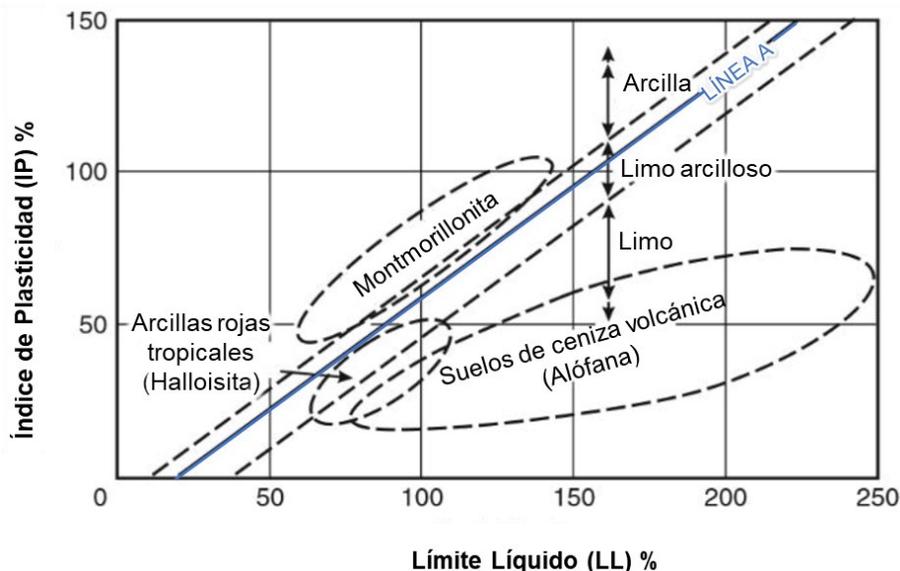
Por último, si el Índice de Liquidez es mayor a 1, indica que al remoldear el suelo, se transforma en un geomaterial viscoso que fluye como líquido (Das, 2001).

**Minerales de arcilla.** Casagrande sugirió usar los Límites de Atterberg para aproximarse a la identificación de los minerales de arcilla presentes en el suelo fino. En 1976, Mitchell adicionó regiones a la Carta de Plasticidad de Casagrande, donde zonifica diferentes minerales como montmorillonita, illita, caolinita, halloisitas y cloritas (Figura 10), en función del Límite Líquido e Índice de Plasticidad que exhiban los suelos (Holtz & Kovacs, 1981). Al proyectar los minerales en la Carta de Casagrande, se tiene que las plasticidades más bajas se presentan en caolinitas, más altas en montmorillonitas, e intermedias en illitas (Carretero & Pozo, 2008).



**Figura 10.** Carta de Plasticidad de Casagrande, modificada por Mitchell (1976 en Holtz & Kovacs, 1981).

Por su parte, autores como Wesley (1973, 2010), Moore & Styles (1988), Suzuki & Kitazono (1998), evaluaron suelos alofánicos en Indonesia, Nueva Guinea y Japón, adicionando una región a la Carta de Plasticidad de Casagrande, que se ubica debajo de la línea A, y los clasifica como MH (Hermosilla, 2010) (Figura 11).



**Figura 11.** Carta de Plasticidad de Casagrande, modificada por Wesley (2010 en Galvis, 2018).

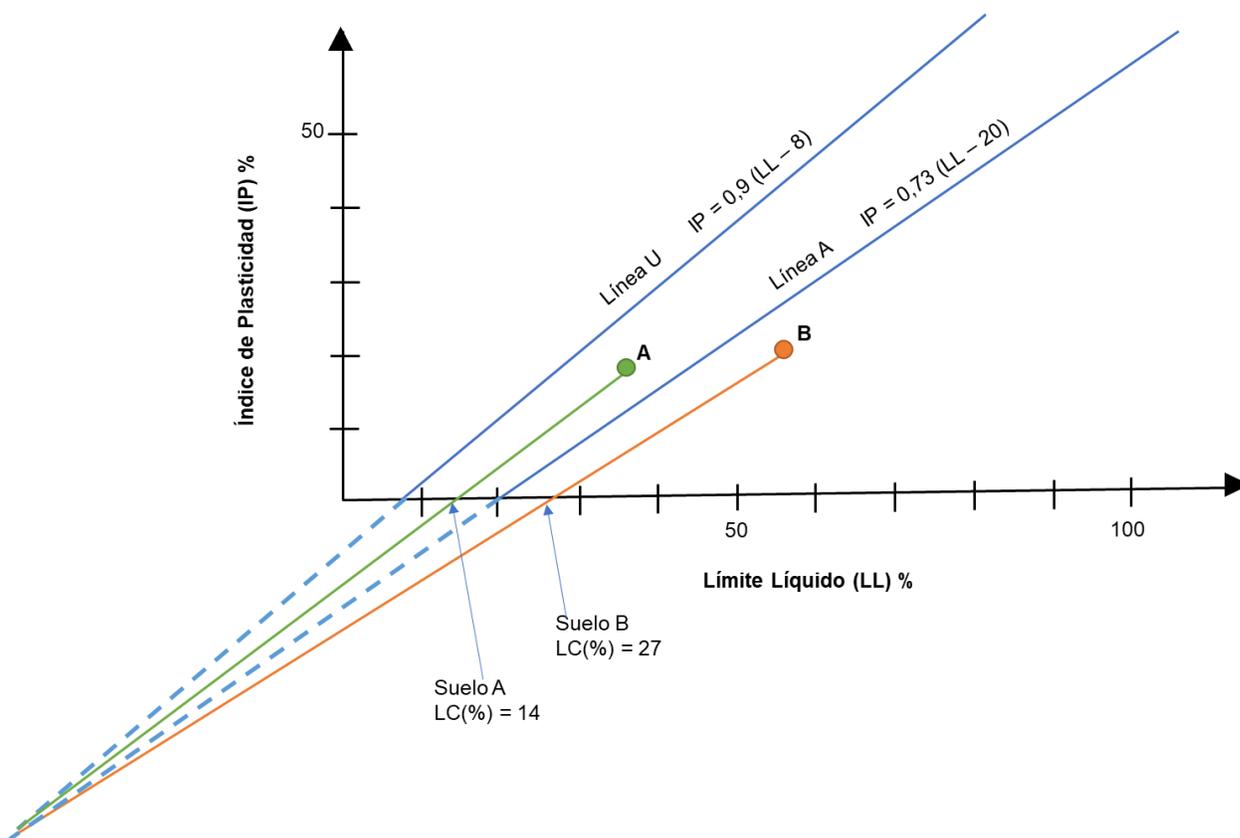
La Tabla 3 resume los rangos de Límite Líquido e Índice de Plasticidad, encontrados en suelos estudiados por múltiples autores, a partir de los cuales se puede tener una aproximación al mineral de arcilla que predomina en el suelo fino (Mitchel & Soga, 2005).

**Tabla 3.** Límites de Atterberg para diferentes minerales de arcilla (Mitchel & Soga, 2005).

Mineral	Límite Líquido (%)	Índice de Plasticidad (%)
Montmorillonita	100 – 900	50 – 100
Nontronita	37 – 72	19 – 27
Illita	60 – 120	35 – 60
Caolinita	30 – 110	25 – 40
Halosita hidratada	50 – 70	47 – 60
Halosita deshidratada	35 – 55	30 – 45
Atapulgita	160 – 230	100 – 120
Clorita	44 – 47	36 – 40
Alófana (sin secar)	200 – 250	130 – 140

**Límite de Contracción.** Casagrande sugirió un método gráfico para determinar el Límite de Contracción a partir de la Carta de Plasticidad, teniendo en cuenta el punto donde se intersecan las líneas U y A, si se extienden hasta converger (-43,5 y -46,4). El procedimiento consiste en dibujar una línea desde el punto de intersección de las rectas A y U, de coordenada mencionada, hasta el punto donde se ubica el suelo en la Carta de Plasticidad

(abscisa: Límite Líquido, ordenada: Índice de Plasticidad), y tomar como Límite de Contracción, la intersección de dicha línea con el eje X (Figura 12) (Carter & Bentley, 1991).



**Figura 12.** Método gráfico para determinar Límite de Contracción (Modificado de Carter & Bentley, 1991).

El concepto del Límite de Contracción puede usarse en la caracterización de los suelos finos, para evaluar su potencial de contracción, y con ello, predecir la posibilidad de que surjan grietas en obras emplazadas sobre este tipo de suelos (I.N.V.E. – 127).

**Expansividad.** Las arcillas tienen capacidad de contraerse al perder humedad y expandirse cuando la ganan nuevamente. En el desarrollo de esa propiedad, se activan los minerales de arcilla presentes: montmorillonita, vermiculita y algunas variedades de haloisita (NSR-10). Un caso especial de minerales arcillosos corresponde a la alófana, cuyos cambios en las propiedades físicas por procesos de desecación, son irreversibles, indicando que estos suelos, pese a sus características plásticas, presentan baja expansividad (Herrera, 2006).

La NSR-10 recomienda identificar el comportamiento de edificaciones emplazadas sobre suelos arcillosos expansivos, y hacer una revisión de asentamientos diferenciales, pérdida

de verticalidad, fisuras, entre otras manifestaciones de la actividad de las arcillas. Así mismo, presenta unos criterios para evaluar el potencial de expansión de los suelos finos en función de los valores de Límite Líquido, Índice de Plasticidad, Límite de Contracción, entre otras variables (Tabla 4).

**Tabla 4.** Clasificación de suelos expansivos (NSR-10).

Potencial de expansión	Expansión (%) medida en consolidómetro bajo presión vertical de 0,07 kgf/cm <sup>2</sup>	Límite Líquido LL, en %	Límite de Contracción LC, en %	Índice de Plasticidad IP, en %	Porcentaje de partículas menores de una micra ( $\mu$ m)	Expansión libre EL, en %, medida en probeta
Muy alto	> 30	> 63	< 10	> 32	> 37	> 100
Alto	20 – 30	50 – 63	6 – 12	23 – 45	18 – 37	> 100
Medio	10 – 20	39 – 50	8 – 18	12 – 34	12 – 27	50 – 100
Bajo	< 10	< 39	> 13	< 20	< 17	< 50

Respecto de la determinación en el laboratorio de los denominados Límites de Atterberg, es importante considerar la calidad del agua de mezcla. Poca información sobre la influencia de esta variable en la obtención de tales contenidos de humedad ha sido socializada en el mundo científico; mayormente los ensayos se realizan conforme lo determinan las normas. Sin embargo, en la práctica, a nivel terreno, los suelos son frecuentemente activados por aguas de diferente naturaleza (lluvias ácidas, aguas negras, aguas residuales mineras, aguas con trazas de hidrocarburos, etc.). Investigaciones previas adelantadas por los autores de esta nueva pesquisa académica, revelan que las propiedades índices de los geomateriales varían apreciablemente cuando se mezclan con aguas residuales mineras, mejorando, en el caso de las arcillas hiperactivas, sus condiciones características (compresibilidad, plasticidad, expansividad) y, sugiriendo una posible utilización de tales aguas como elemento estabilizador de suelos expansivos (Patiño et al., 2017).

### 3.2.2 Resistencia al esfuerzo cortante

La resistencia de un suelo al esfuerzo cortante, es la máxima capacidad que tiene el geomaterial para oponerse a ceder (resistir) ante sollicitaciones de carga (fuerzas de deslizamiento, rotación, avalanchas, fallas en excavaciones, entre otros procesos de carga) y, explica por qué las fuerzas mencionadas se tratan como un modelo de fricción en términos

de los parámetros de resistencia del suelo, cuando se abordan proyectos de diseño de obras de contención, cimentaciones y taludes. En esencia, la resistencia del suelo es una respuesta interna del geomaterial a los esfuerzos cortantes producidos por las cargas o esfuerzos externos aplicados.

La resistencia cortante del suelo es una propiedad interna (ante la falla y el deslizamiento a lo largo de cualquier plano dentro de él) por área unitaria y, se expresa en unidades de presión (e.g.: kN/m<sup>2</sup>, kgf/cm<sup>2</sup>). La naturaleza de la resistencia cortante permite analizar problemas de estabilidad del suelo en la determinación de su capacidad de carga, estabilidad de taludes y estimación de la presión lateral sobre estructuras de contención (Das, 2001).

En el marco de la teoría de la elasticidad, los suelos, al igual que otros materiales, bajo ciertas sollicitaciones, se comportarán como materiales elásticos. Sin embargo, en ocasiones registran deformaciones mayores de las normales, por lo que será un factor predominante el considerar la plasticidad del geomaterial. Una masa de suelo puede revelar diferentes tipos de fallas como disgregamiento, deslizamiento en líneas de rotura o fluencia plástica. La resistencia al esfuerzo cortante está representada por el criterio de falla Mohr-Coulomb (1776), y está dada por la Ecuación 6.

$$\tau = c + \sigma \tan\varphi \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

$\tau$  = resistencia al corte, esfuerzo cortante sobre el plano de falla

$c$  = cohesión

$\sigma$  = esfuerzo normal intergranular sobre el plano de falla

$\varphi$  = ángulo de fricción interna

La cohesión se define como la adherencia entre las partículas del suelo debida a la atracción entre ellas, generada por las fuerzas intergranulares, y el ángulo de fricción interna, es dependiente de la uniformidad de las partículas del suelo, del tamaño y la forma de los granos y de la presión normal.

En términos de esfuerzos efectivos, lo mencionado anteriormente puede reescribirse como la Ecuación 7.

$$\tau' = c' + \sigma' \tan \varphi' \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

$\sigma' = \sigma - u$ , siendo  $\sigma'$  el esfuerzo efectivo o intergranular y  $u$ , la presión del agua.

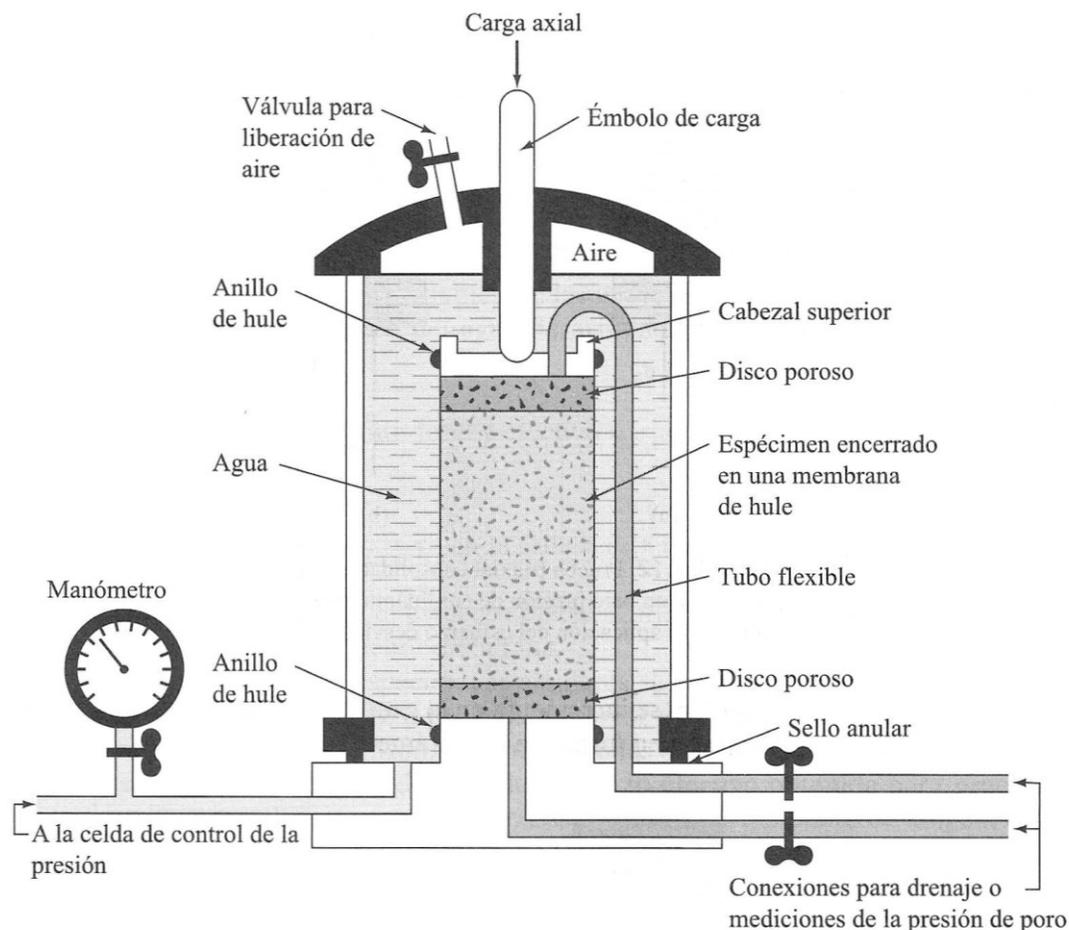
### 3.2.2.1 Pruebas de laboratorio para determinar la resistencia al esfuerzo cortante

Las pruebas que posibilitan la obtención de la resistencia al cortante de los suelos son: la prueba a la compresión inconfiada que es un ensayo unidimensional de carga, la prueba de corte directo que corresponde a un ensayo biaxial, y la prueba triaxial que consiste en aplicar tres cargas a lo largo de igual número de ejes intersecados y perpendiculares.

En la prueba triaxial, la muestra es sometida inicialmente a presión de celda o de confinamiento ( $\sigma_3$ ), de tipo neumático o hidráulico y, posteriormente le es aplicado un esfuerzo desviador ( $\sigma_1$ ) que lleva la muestra a estado de falla. El equipo normalmente utilizado para este ensayo puede verse en la Figura 13 (Das, 2001).

En el caso de las arcillas, existen tres tipos de prueba con el equipo triaxial:

- (i) Consolidada drenada (CD). Es una prueba válida para análisis geotécnico de largo plazo; en este ensayo, primero se consolida la muestra y luego se hace la prueba en condición drenada. Ensayo de larga duración.
- (ii) Consolidada no drenada (CU). En esta prueba se consolida la muestra, pero no se permite el drenaje durante la ejecución del ensayo. Ensayo de duración intermedia.
- (iii) No consolidada no drenada (UU). Un ensayo no consolidado no drenado (o ensayo rápido), no permite el drenaje del agua durante la aplicación de la presión de confinamiento y el esfuerzo desviador. Los resultados de este tipo de ensayo, son usados principalmente para modelar la colocación rápida de cargas sobre mantos de arcilla saturada y de baja permeabilidad (Suárez, 1998).



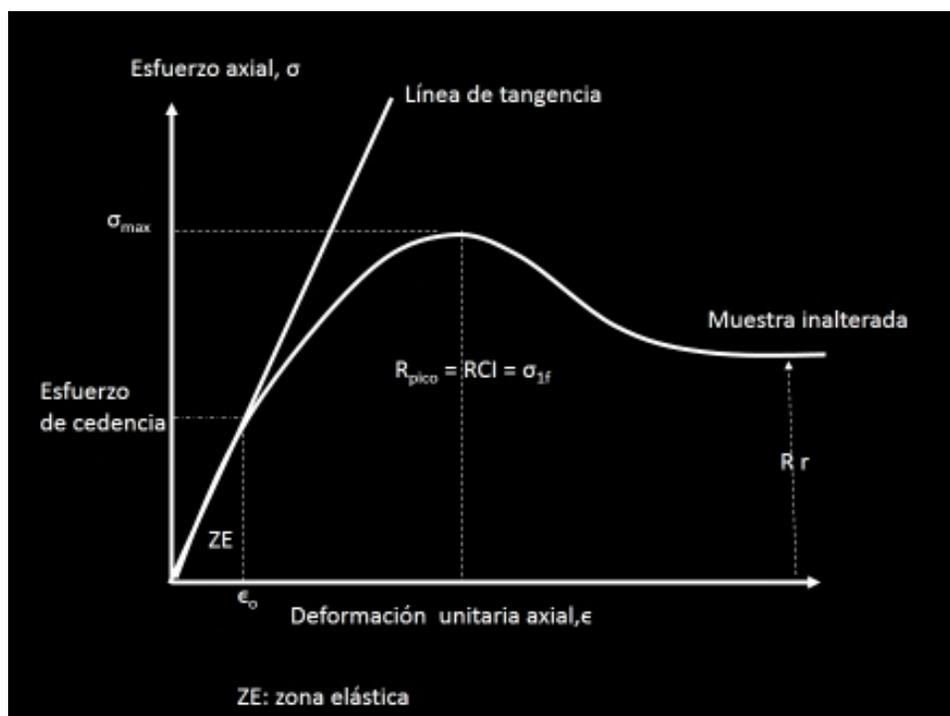
**Figura 13.** Esquema del equipo de prueba triaxial (Tomado de Das, 2001).

### 3.2.2.1.1 Pruebas de resistencia a la compresión inconfiada (RCI)

En materia de muestreo, ensayos y caracterización de suelos para propósitos ingenieriles en Colombia, uno de los procedimientos usuales es la prueba de compresión inconfiada (estipulada en la norma I.N.V.E-152, coherente con la norma ASTM D2166-06). Pese a que este ensayo ofrece valores no muy cercanos a la realidad en términos del comportamiento del suelo, es de amplio uso, debido a su facilidad de ejecución y bajo costo (Trujillo & Cobos, 2017).

La prueba de resistencia a la compresión inconfiada, corresponde a un tipo especial de ensayo triaxial no consolidado no drenado, donde el espécimen no se somete a carga de confinamiento, es decir,  $\sigma_3 = 0$ . En este ensayo, se genera la falla aplicando rápidamente una carga axial ( $\sigma_1$ ) (Leal et al., 2015).

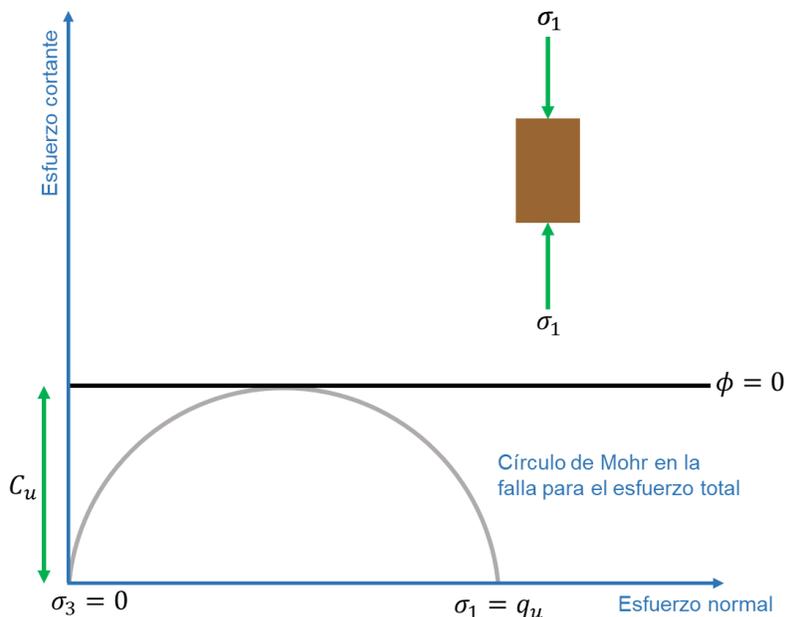
Con los datos de laboratorio (esfuerzos aplicados hasta lograr la falla del elemento y deformaciones registradas), se dibuja la curva esfuerzo vs deformación unitaria, a partir de la cual se deduce el valor de la resistencia a la compresión inconfínada (RCI), el cual debe corresponder al esfuerzo axial principal mayor a falla, en el momento en que esta ocurre (Figura 14).



**Figura 14.** Curva de esfuerzo normal vs deformación unitaria, derivada de datos de prueba de compresión inconfínada.

Con el esfuerzo principal mayor a falla, tomado de la curva mostrada en la Figura 14, que es la resistencia a la compresión simple (RCI), y con la condición de presión de celda nula en el ensayo de compresión inconfínada, se dibuja el círculo de Mohr en el plano cartesiano  $\tau$  vs  $\sigma$ , a partir del cual se deducen los parámetros de resistencia del geomaterial ensayado (Figura 15) (Ecuación 8) (Das, 2012).

$$\tau_f = \frac{\sigma_1}{2} = \frac{q_u}{2} = C_u \quad \text{Ecuación 8}$$



**Figura 15.** Prueba de compresión simple (Modificado de Das, 2001).

En términos de la relación esfuerzo-deformación, en este ensayo es posible analizar dos tipos de resistencia: la resistencia máxima o resistencia pico que posee el material que no ha sido fallado previamente (la cual corresponde al punto más alto de la curva esfuerzo-deformación), y la resistencia residual, que se exterioriza después de que el geomaterial ha experimentado la falla. Sin embargo, en los suelos residuales, la resistencia pico tiende a ser muy similar a la resistencia residual.

El ensayo de RCI es aplicable solo a materiales cohesivos y que no expulsan agua durante la etapa de carga de prueba, y que mantienen su resistencia intrínseca después de remover las presiones de confinamiento, como las arcillas o los suelos cementados (Montoya, 2014). La prueba no ofrece resultados significativos en suelos secos friables, materiales fisurados o que tienen estructuras de falla y, algunos tipos de loess o de cenizas volcánicas, en turbas, arcillas muy blandas, materiales laminados o varvados, y muestras que tienen cantidades significativas de limos o arenas (todos con propiedades cohesivas) (Jiménez & Justo, 1975).

Respecto de lo señalado en el párrafo anterior, infortunadamente el autor no especifica la razón de la afirmación; es decir, la causa para señalar que los resultados de la prueba RCI en estos materiales no son significativos. Probablemente, el carácter alterado de dichos materiales (asociada a su friabilidad, fisuramientos), el grado de consistencia de las

muestras, ensayadas (la relación de la humedad de la muestra en contraste con sus Límites de Atterberg), la sensibilidad de las muestras a operaciones de tallado o remoldeo, la naturaleza y estructura de las muestras, la calidad de la muestra (inalterada, remoldeada, compactada) entre otros factores pudieran explicar, afirmar o rebatir los planteado. Será un aspecto que se procurará aclarar en el marco de la presente investigación en marcha.

### **3.2.2.2 Correlaciones a partir de la resistencia a la compresión inconfiada.**

El concepto de correlación es empleado usualmente en estadística descriptiva, para hacer referencia a los nexos o interdependencia entre dos o más variables. La correlación se pone de manifiesto cuando dos elementos tienen armonía en su variación. Tal armonía es dependiente; esto significa que la estabilización de una, depende la posición de la otra.

Es posible verificar, en forma gráfica, el grado correlacional o la funcionalidad entre dos variables, en atención a que las líneas que la conforman, indican las tendencias de movimiento de la estadística en estudio. Es decir, se puede observar si la tendencia de una variable es permanecer constante, o variar (creciendo o decreciendo) cuando la otra variable se dinamiza en uno u otro sentido. A manera de ejemplo, se citan dos correlaciones geotécnicas en este informe: RCI vs consistencia de suelos arcillosos y RCI vs presión efectiva de sobrecarga in situ.

***Consistencia del suelo.*** La consistencia es un concepto usualmente aplicado a suelos que exhiben cohesión; por consiguiente, es una propiedad fuertemente dependiente del contenido de humedad, el cual es una propiedad de estado. La consistencia del suelo mide la firmeza con que se unen sus partículas integrantes, y se relaciona, sin ser, con la resistencia de los suelos a la deformación y al cortante o ruptura. Esto significa que la resistencia de los suelos debe determinarse según los métodos y procedimientos estandarizados para tal estimación. El valor de resistencia obtenido con penetrómetro de bolsillo es un indicador de consistencia, pero no es propiamente la resistencia del suelo.

La consistencia del suelo se estima en muestras con diferentes grados de humedad; condiciones de suelo mojado, húmedo y seco. En los suelos mojados, la consistencia se expresa como adhesividad y plasticidad; puede estimarse en el campo mediante ensayos

sencillos, o medirse con mayor exactitud en el laboratorio. La prueba para la determinación de la consistencia del suelo mojado se realiza en muestra de suelo saturado de agua (ejemplo, después de una lluvia de alta intensidad). Primero, se determina la adhesividad (calidad de los geomateriales de adherirse a otros objetos), después, se obtiene la plasticidad (capacidad de un suelo de aceptar deformación permanente, no recuperable). La plasticidad explica porqué un suelo fino cambia continuamente de forma, pero no de volumen, bajo la acción de una presión constante, y mantiene dicha forma al desaparecer la presión.

Los resultados del ensayo de penetrómetro de bolsillo son indicadores de consistencia y no de resistencia, y los valores de  $q_u$  obtenidos en el ensayo de compresión simple (obtenidos mediante penetrómetro de bolsillo, in situ), se relacionan con la consistencia aproximada de los suelos analizados, como lo indica la Tabla 5.

**Tabla 5.** Relación de la consistencia y resistencia a compresión simple (Das, 2001).

Consistencia	$q_u$ ( $kN/m^2$ )
Muy blanda	0 – 25
Blanda	25 – 50
Media	50 – 100
Firme	100 – 200
Muy firme	200 – 400
Dura	> 400

**Presión de sobrecarga efectiva en campo.** Diversos autores han establecido relaciones empíricas entre la resistencia al corte no drenada ( $C_u$ ) de los suelos arcillosos, y su presión de sobrecarga efectiva en el campo ( $\sigma'_0$ ) (Tabla 6).

**Tabla 6.** Ecuaciones empíricas relacionadas con  $C_u$  y  $\sigma'_0$  (Das, 2012). La ecuación de Bjerrum y Simons se tomó de Peck et al., (1983).

Referencia	Relación	Comentarios
Skempton (1957)	$\frac{C_{u(VST)}}{\sigma'_0} = 0,11 + 0,00037 (IP)$ $IP = \text{Índice de Plasticidad (\%)}$ $C_{u(VST)} = \text{resistencia cortante no drenada de la prueba de corte con veleta}$	Para arcilla normalmente consolidada.

Referencia	Relación	Comentarios
Chandler (1988)	$\frac{C_{u(VST)}}{\sigma'_c} = 0,11 + 0,0037 (IP)$ $\sigma'_c =$ presión de preconsolidación	Se puede utilizar en suelo sobreconsolidado; precisión $\pm 25\%$ ; no válida para arcillas sensitivas y fisuradas.
Jamiolkowski y cols. (1985)	$\frac{c_u}{\sigma'_c} = 0,23 \pm 0,04$	Para arcillas ligeramente consolidadas.
Mesri (1989)	$\frac{c_u}{\sigma'_0} = 0,22$	
Bjerrum y Simons (1960)	$\frac{c_u}{\sigma'_0} = 0,10 + 0,004 IP\%$	Suelo fino normalmente consolidado.
Ladd y cols. (1977)	$\frac{\left(\frac{c_u}{\sigma'_0}\right)_{sobreconsolidada}}{\left(\frac{c_u}{\sigma'_0}\right)_{normalmente\ consolidada}} = OCR^{0,8}$	

$$OCR = \text{Relación de sobreconsolidación} = \frac{\sigma'_c}{\sigma'_0}$$

Así mismo, Bjerrum y Simons (1960) establecieron que para arcillas normalmente consolidadas con Índice de Liquidez (IL) > 0,5:

$$\frac{c_u}{\sigma'_c} = 0.118IL^{0.15} \quad \text{Ecuación 9}$$

Y para arcillas normalmente consolidadas con Índice de Plasticidad (IP) > 50%:

$$\frac{c_u}{\sigma'_c} = 0.45 \left(\frac{IP\%}{100}\right)^{0.5} \quad \text{Ecuación 10}$$

### 3.2.3 Propiedades índice en suelos derivados de ceniza volcánica

La Tabla 7 presenta los rangos de propiedades físicas y mecánicas determinadas por diversos autores y recopiladas por Herrera (2006), para suelos derivados de ceniza volcánica en diferentes partes del mundo.

**Tabla 7.** Propiedades índices en suelos derivados de ceniza volcánica (Herrera, 2006).

Propiedades	Colombia	Otros países
pH	4,5 – 6,2	[2] 6
	6,1 – 6,3	[3] 4,6 – 5,2
	5,1 – 5,8	[4] 3,6 – 8
		India [21]
		USA [6]
		Japón [20]

Propiedades	Colombia		Otros países		
			4,8 – 7,2	Nueva Zelanda	[16]
			5,7 – 6,2	Java	[25]
			5,8 – 6,7	Hawai	[26]
$G_s$	2,47 – 2,65	[4]	2,58 – 2,59	Ecuador	[15]
	1,92 – 2,67	[1]	2,67 – 2,74	Japón	[13]
	2,50 – 2,67	[31]	2,28 – 2,65	Fiji	[8]
$S_a[m^2g^{-1}]$	170 – 340	[31]	50 – 250	Japón	[20]
			581 Alófana (adsorción de N <sub>2</sub> )	–	[19]
$e$	2,0 – 7,0	[3]	2,4 – 5,3	Indonesia	[28]
	1,1 – 1,9	[24]	1,5 – 8	Indonesia	[30]
	2,0 – 2,7	[4]	1,9 – 4,1 predomina alófana	India	[22]
	0,88 – 3,62	[1]	3,0 – 5,7	Japón	[7]
	1,3 – 3,8	[31]	1,0 – 6,1	Japón	[11]
			1,8 – 6,6	Java	[25]
$w_o$	80 – 200%	[3]	50 – 300%	Indonesia	[30]
	16 – 90%	[1]	50 – 100%	India	[21]
	29 – 119%	[31]	102 – 205%	Japón	[7]
			40 – 50%	Japón	[13]
			27 – 184%	Japón	[11]
$w_L$	52 – 64%	[4]	70 – 110% predomina haloisita	Indonesia	[28]
	60 – 70%	[14]	85 – 190% predomina alófana	Indonesia	[28]
	120 – 250%	[17]	95 – 107% predomina haloisita	New Guinea	[12]
	37 – 117%	[31]	156 – 165% predomina alófana	New Guinea	[12]
			179 – 187%	Indonesia	[29]
			80 – 213%	India	[21]
			72 – 159%	Japón	[20]
			105 – 107%	Ecuador	[10]
			31 – 40%	Japón	[13]
$w_P$	27 – 33%	[4]	55 – 75%	Indonesia	[28]
	45 – 50%	[14]	65 – 150%	Indonesia	[28]
	70 – 150%	[17]	65 – 73%	New Guinea	[12]
	25 – 90%	[31]	119 – 129%	New Guinea	[12]
			139 – 149%	Indonesia	[29]
			40 – 100%	Japón	[20]
			17 – 20%	Japón	[13]
		~60%	Ecuador	[10]	
$S_T$	65 – 88%		50 – 80%	India	[18]
		[31]	> 95%	Japón	[7]
$\gamma_a[kN/m^3]$	8,70 (limo arenoso)	[24]	4,0 – 7,2	Japón	[7]
	10,7 (arena limosa)	[24]	3,8 – 12,7	Japón	[11]
	7,0 – 8,4	[4]	7,9 – 9,8	Fiji	[8]
	4,5 – 13,8	[1]	4,3 – 7,6	Java	[25]
	5,7 – 13,8	[31]			
$\gamma_{sat}[kN/m^3]$	15,1 (limo arenoso)	[24]	13,3 – 14,9	India	[25]
	16,1 (arena limosa)	[24]	11 – 14	Ecuador	[15]

Propiedades	Colombia		Otros países		
	12,8 – 13,1	[31]	21,8 – 25,7	Japón	[11]
$k [m/s]$	$8,1 \times 10^{-7} - 16 \times 10^{-5}$	[5]	$2,0 \times 10^{-5}$	Ecuador	[9]
	$8,1 \times 10^{-7}$ (limo arenoso)	[24]	$3,0 \times 10^{-5}$	Costa Rica	[9]
	$4,4 \times 10^{-6}$ (arena limosa)	[14]	$1,0 \times 10^{-9} - 1,3 \times 10^{-8}$ predom. haloisita	Indonesia	[28]
	$7,0 \times 10^{-8}$		$0,8 \times 10^{-9} - 2,7 \times 10^{-8}$ predom. alófana	Indonesia	[28]
			$1,4 \times 10^{-6} - 5,6 \times 10^{-6}$	Dominica	[22]
$\Phi [^\circ]$	26 – 43	[3]	30 – 40	Indonesia	[30]
	29 – 39 (arena limosa)	[24]	38 – 40	India	[21]
	22 – 29 (limo arenoso)	[24]			
	30 – 38	[14]			
$S_u [KPa]$	26 – 309	[1]	65 – 200	Indonesia y	[30]
	25 – 135	[14]	100 – 230	New Zealand	
			20 – 160	Japón	[9]
			Japón	[23]	
$V_s [m/s]$	100 – 210	[3]	135 – 175	Japón	[23]
	100 – 180	[31]			

Nota: [1] Arango, 1993, [2] Benavides, 1982, [3] Forero et al., 1999, [4] IGAC (1996), [5] Imeson and Vis, 1982, [6] Johnson-Maynard et al., 1997, [7] Kitazono et al., 1987, [8] Knight, 1986, [9] Maeda et al., 1977, [10] Mendoza, 1985, [11] Miura, 2003, [12] Moore and Stylez, 1988, [13] Moroto, 1991, [14] Olarte, [15] O'Rourke and Crespo, 1988, [16] Parfitt and Kimble, 1989, [17] Rivera J.D., 2003, [18] Rouse et al., 1986, [19] Shoji, 1993, [20] So, 1998, [21] Rao, 1995, [22] Rao, 1996, [23] Sahaphol and Miura, 2005, [24] Terlien, 1997, [25] Van Ranst et al., 2002, [26] Wada, 1990, [27] Warkentin and Maeda, 1974, [28] Wesley, 1977, [29] Wesley, 2001, [30] Wesley, 2003, [31] Herrera, 2006.

Los suelos volcánicos, casi siempre se circunscriben a regiones con volcanismo activo o no muy antiguo; están formados sobre cenizas y vidrios volcánicos o, a partir de otros materiales piroclásticos, se denominan generalmente como “andosoles”. En estado relativamente reciente de haberse formado o depositados, exhiben colores oscuros, alta porosidad, son permeables, de buena estructura, fáciles de trabajar, alta fertilidad aun cuando tienen algunas restricciones. Bajo condiciones de relieve favorable, se trata de suelos muy aptos para la agricultura (Ibáñez & Manríquez, 2011).

## **4. Metodología**

### **4.1 Tipo de investigación**

La investigación aquí desarrollada fue de tipo exploratoria, por cuanto realiza una primera aproximación sobre la tendencia correlacional que puede existir entre dos variables geotécnicas (Límites de Atterberg y resistencia a la compresión inconfina) de las cenizas volcánicas depositadas superficialmente en la ciudad de Manizales.

De existir antecedentes sobre las ecuaciones constitutivas buscadas, no se registra en el ámbito regional y/o nacional información ampliamente publicitada, que demuestre que se han cruzado datos sobre estas dos importantes propiedades geotécnicas. Esta temática que ha sido investigada lo suficiente, se apoya en un ejercicio de meta-análisis de datos geotécnicos existentes sobre las cenizas volcánicas de la ciudad de Manizales.

Por esta razón, el trabajo investigativo fue de tipo correlacional y estableció mediante técnica de regresión estadística, la expresión que correlaciona los Límites de Atterberg con la resistencia a la compresión inconfina, y el grado de resolución de dicha correlación.

### **4.2 Población y muestra**

#### **4.2.1 Población**

Estudios geotécnicos y de caracterización realizados a la fecha, a los depósitos superficiales de ceniza volcánica en el municipio de Manizales.

#### **4.2.2 Muestra**

Se realizó un muestreo de tipo probabilístico en el cual cada elemento de la población tiene igual posibilidad de ser seleccionado en la muestra, de tal forma que la elección de ésta fuese al azar.

En tal sentido, el tamaño de la muestra fue delimitado al objetivo central del estudio, las características de la población, los recursos disponibles y el tiempo para el desarrollo de la investigación, procurando que la información fuera representativa, válida y confiable, de fácil acceso y bajo costo.

Para la obtención del tamaño de la muestra (número de estudios de suelos a evaluar, los cuales aportaron para la presente investigación, la información existente sobre los suelos volcánicos de Manizales) se hizo uso de la Tabla 8, que muestra los niveles de confianza (Calle et al., 2014). En este ejercicio se cumple el principio de que todos los elementos tienen igual probabilidad de ser seleccionados.

**Tabla 8.** Niveles de confianza para calcular el tamaño de la muestra (Calle et al., 2014).

Criterio	Valores de confianza				
	95%	90%	85%	80%	75%
<b>Z</b>	1,96	1,65	1,44	1,28	1,15
<b>Z<sup>2</sup></b>	3,84	2,72	2,074	1,64	1,33
<b>e</b>	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25
<b>e<sup>2</sup></b>	0,0025	0,01	0,0225	0,04	0,0625

El procedimiento seguido consistió en:

1. Obtención del nivel de confianza (Z) deseado. Fue adoptado un nivel de confianza del 90%, equivalente a tener un margen de error del 10%. Para este nivel de confianza, se obtuvo de la Tabla 8, un valor  $Z = 1.65$ .
2. Probabilidad de ocurrencia de un evento. La probabilidad de que efectivamente ocurra un evento fue denominada "p" y, la probabilidad de que dicho evento no ocurra fue denominada "q", de modo que la suma  $p + q$  es invariablemente igual a la unidad (1).

Para efectos del presente trabajo, se parte de los siguientes supuestos:

- Se tiene una probabilidad del 50% (p) de que los estudios de suelos consultados registren simultáneamente información sobre Límites de Atterberg y de resistencia a la compresión inconfínada. Se tiene una probabilidad del 50% (q) de que los estudios de suelos consultados no registren datos sobre una o las dos variables (Límites de Atterberg y resistencia a la compresión inconfínada).

- Se tiene una probabilidad del 50% (p) de que exista un grado de correlación entre los Límites de Atterberg y la resistencia a la compresión inconfiada, y existe una probabilidad del 50% de que tales variables no guarden relación alguna (q).

De modo que  $p + q = 0,5 + 0,5 = 1$ .

3. Grado de error máximo aceptable. Se asume que varía en el rango  $0\% \leq e \leq 10\%$ , estimando que valores superiores a este, reducen la validez de la información.
4. Tamaño de la muestra. Fue aplicada la Ecuación 11, para estimar el tamaño de la muestra cuando se desconoce la población.

$$\eta_o = \frac{z^2 * p * q}{e^2} \quad \text{Ecuación 11}$$

Siendo,

$\eta_o$ : tamaño de la muestra, si se desconoce la población o la población es exageradamente grande como para considerarla "infinita"

z: valor del nivel de confianza deseado para un grado de certeza

e: porcentaje de error aceptable

p: probabilidad de ocurrencia de un fenómeno

q: probabilidad de no ocurrencia de un fenómeno

Como es difícil establecer el tamaño de la población, se asume una población infinita, para una confiabilidad del 90% (aproximada al entero cercano), arrojando un tamaño de muestra mínima de 68 estudios de suelos que deben ser analizados.

### 4.3 Recopilación de información

La información base para el desarrollo de esta investigación fue facilitada por consultores geotecnistas y/o entidades locales cuya razón de ser se relaciona con los datos requeridos y pertinentes al objeto del presente estudio, o que administran o manejan bases de datos

geotécnicas. Los datos e información obtenidos fueron discriminados con base en el cumplimiento de los criterios de selección de la muestra establecidos en la metodología (representativa, válida, confiable, de fácil acceso y bajo costo). En cierto grado, al momento de la obtención de datos, esta se vio limitada por efectos de las medidas restrictivas de cuarentena e inmovilidad implementadas gubernamentalmente en el contexto de la pandemia por COVID-19; razón que explica, de una parte, la imposibilidad de solicitar información relacionada con los propósitos del proyecto, a entidades públicas como CORPOCALDAS, Alcaldía de Manizales, Unidad de Gestión del Riesgo y, por otra parte, la decisión de optar por recopilar información de empresas privadas de consultoría, las cuales permitieron la búsqueda de los datos correspondientes, en sus respectivas oficinas, con el cumplimiento de los protocolos de bioseguridad.

#### **4.3.1 Bases de datos**

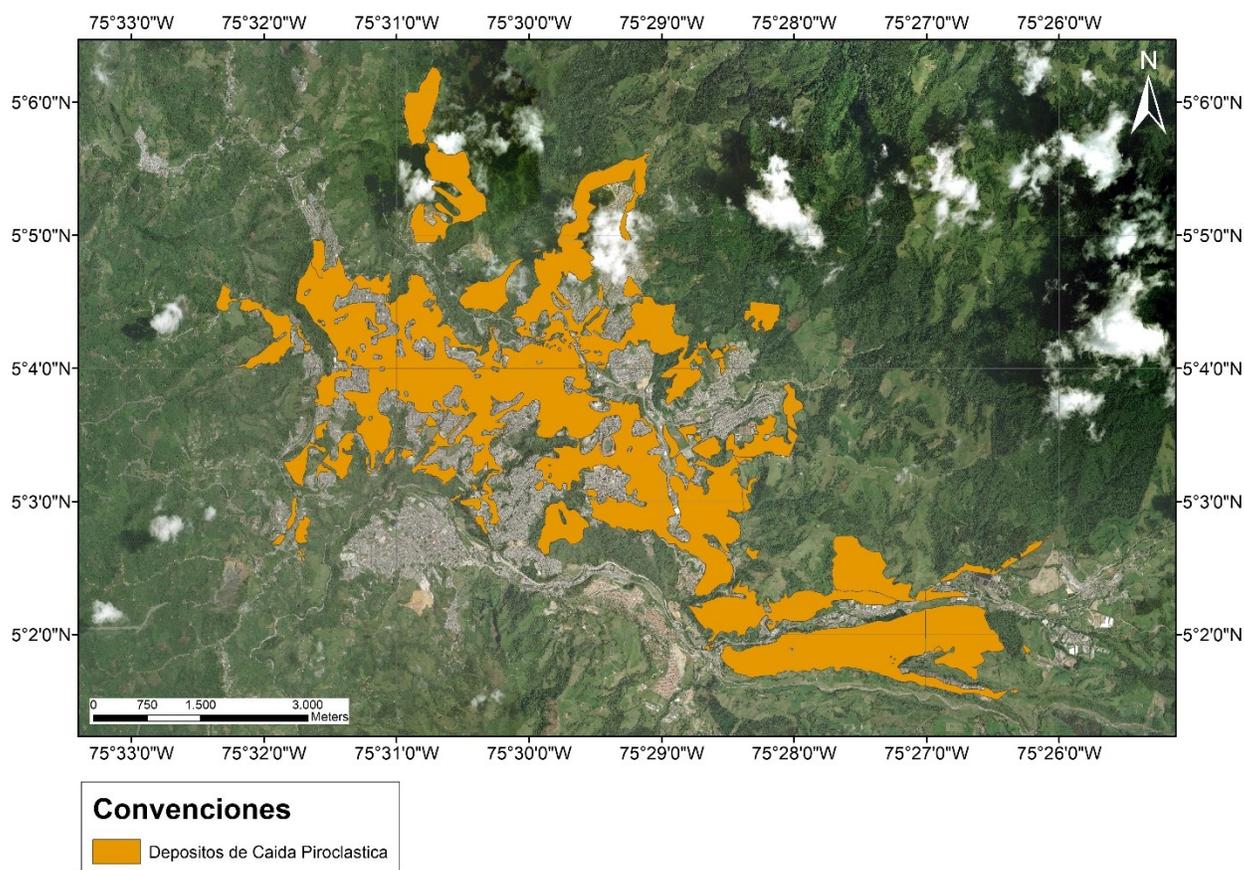
Se tuvo acceso a 185 documentos [*de las empresas Consuas y Perforaciones LTDA (110), Quasar Ingenieros Consultores S.A.S. (43), InGeo Soluciones Geotécnicas S.A.S. (18) y Zenit Ingeniería y Consultoría (14)*], correspondientes a registros de campo y laboratorio, estudios de suelos, análisis de estabilidad de taludes, gestión del riesgo y diseño de diferentes estructuras geotécnicas, entre otros.

Del total de informes consultados, fueron seleccionados 68 estudios en el área urbana de Manizales (muestra mínima para obtener un grado de confiabilidad de 90%). Se evidenció que todos los elementos de la muestra correspondieran a sitios con presencia de depósitos de caída piroclástica y con datos de laboratorio, incluyeran al menos propiedades de clasificación de geomateriales (contenido de humedad, Límites de Atterberg y granulometría), y datos de pruebas de resistencia a la compresión inconfiada, esenciales para cumplir el objetivo de la investigación.

Previo al análisis detallado de la información sobre las propiedades geotécnicas mencionadas para los suelos volcánicos de Manizales, y a la búsqueda de posibles correlaciones entre los Límites de Atterberg y la resistencia a la compresión inconfiada de estos, se hizo una georreferenciación de los puntos muestreados sobre el mapa de

formaciones superficiales de la ciudad, con el ánimo de observar su cobertura espacial. En esa tarea, se realizó el siguiente procedimiento:

- 1- **Localización de puntos explorados.** Los puntos explorados fueron ubicados en el mapa de formaciones superficiales de la ciudad, el cual enseña las formaciones aflorantes en superficie, que contienen depósitos de caída piroclástica (Figura 16). Dicha cartografía geológica ayudó a tener una visión macro a manera de diagnóstico preliminar de la zona urbana de Manizales. El mapa consultado y utilizado para la identificación de los puntos muestreados por los consultores geotécnicos, está contenido en la cartografía temática POT urbano 2017 – 2031, y fue descargado del Geoportal de la Alcaldía de Manizales en formato shapefile-kml.



**Figura 16.** Mapa de formaciones superficiales de Manizales. Depósitos de caída piroclástica en el área urbana de la ciudad.

La información pertinente a localización de los sitios a los cuales les fue practicada caracterización de suelos fue tomada de los informes consultados.

Este ejercicio de ubicar los sitios con información geotécnica útil al objetivo del proyecto en el casco urbano sobre un mapa geológico de Manizales, permitió, además de georreferenciar la muestra de estudios base, observar la presencia de cenizas en cada área estudiada, dentro de las limitaciones que implica identificar áreas locativas tan pequeñas como los predios a los cuales se les realizó estudios geotécnicos en un mapa geológico, dada la escala a la cual fue elaborado este.

- 2- **Revisión de información base.** La información contenida en cada estudio, concerniente a la presencia de depósitos de caída piroclástica en los sitios caracterizados geotécnicamente fue objeto de verificación. Se revisó la existencia o no de datos sobre profundidad del estrato integrado por cenizas en cada estudio, la descripción de los registros de perforación y el componente geológico (local y regional) redactado en los informes de suelos que la incluyeron. Adicionalmente, se realizaron jornadas de identificación in situ a algunos de los sectores referenciados por los estudios de suelos consultados.

#### **4.4 Verificación en campo**

Para validar en campo la presencia de depósitos de caída piroclástica en las zonas fuente de las muestras de suelos caracterizadas, se realizaron jornadas exploratorias donde se evaluaron puntos próximos a los predios estudiados, en los cuales no existieran construcciones. En la Figura 17 se han identificado los sitios tomados como muestra (puntos amarillos), y los sitios constatados (con estrellas destacadas en rojo), y para efecto de describir lo hallado en campo, se escogió un punto origen de coordenadas arbitrario en el centro de la ciudad, de forma que los puntos visitados quedaran agrupados por cuadrantes, los cuales son referenciados en este documento como zonas NW, NE, SW y SE.

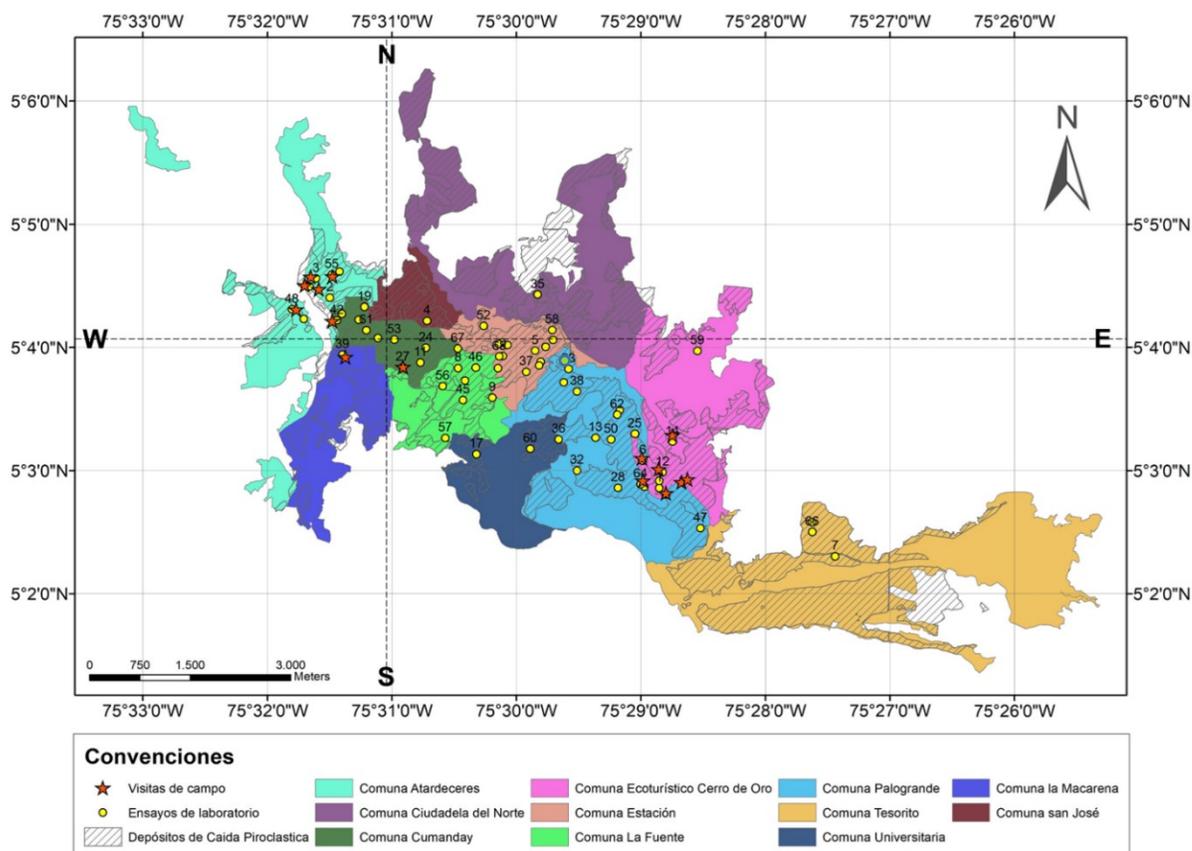


Figura 17. Sectorización de la ciudad, para efectos de análisis de visitas de campo.

#### 4.5 Interpretación de datos de laboratorio

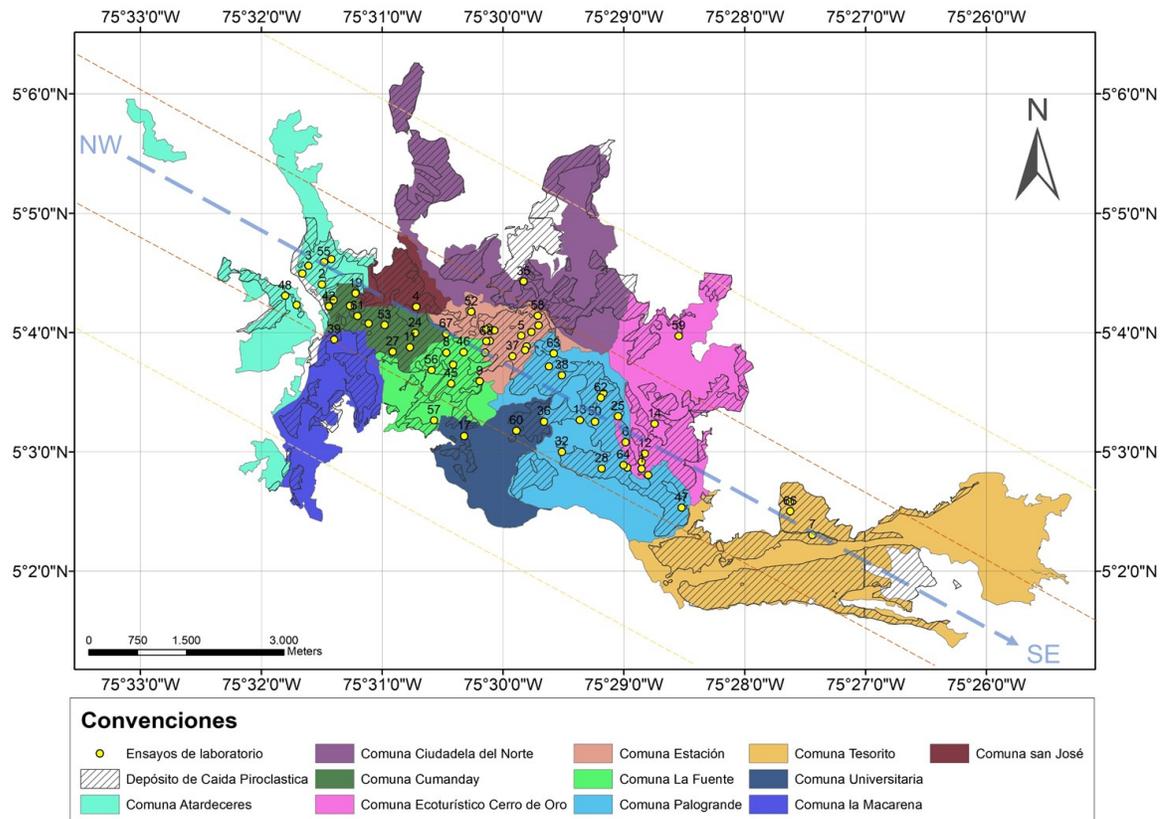
Se diseñaron matrices o tablas de concentración de información, en formato Excel, y se depuró la información obtenida, mediante una lectura crítica e interpretativa de los datos geotécnicos disponibles, haciendo énfasis en los Límites de Atterberg y la resistencia a la compresión confinada de muestras tomadas a diferentes profundidades.

Inicialmente, estos datos se agruparon bajo distintos criterios (profundidad, clasificación en el Sistema Unificado – SUCS –, número de golpes del ensayo SPT), y se plasmaron en diferentes gráficas, para buscar el grado de correlación de las variables mencionadas bajo herramientas de estadística descriptiva, con miras a determinar la ecuación de correlación y su grado de resolución. El análisis gráfico incluyó el uso la Carta de Plasticidad diseñada por Casagrande (1942) y modificada por Mitchell (1976), con el objeto de zonificar las muestras dentro de la herramienta típica usada para clasificación de suelos finos, y relacionar sus propiedades índices como parte del proceso de discusión.

## 5. Resultados

Este capítulo registra los resultados de los análisis y metaanálisis realizados a la información secundaria (estudios de suelos generados por firmas de consultoría radicadas en el municipio de Manizales) y a los datos de naturaleza primaria obtenidos en el marco de esta investigación, por ende, se muestran diagramas y correlaciones entre variables, pero no se hace, en esta unidad, discusión de los resultados y/o hallazgos encontrados, tema éste que estará concentrado en el Capítulo 6.

Los puntos en amarillo que se muestran en la Figura 18, corresponden a la ubicación georreferenciada de los sitios que constituyen la muestra estadística de esta investigación, a los cuales se les realizó estudios geotécnicos, y cuyos informes fueron consultados.



**Figura 18.** Distribución espacial de los puntos de muestreo en el área urbana de Manizales, en donde se cuenta con presencia de depósitos de caída piroclástica y ensayos de laboratorio en las muestras correspondientes.

Al superponer el mapa de formaciones superficiales mostrado anteriormente (Figura 16), el cual destaca en color naranja la presencia de material piroclástico en la ciudad de Manizales, sobre el mapa de distribución administrativa de comunas de dicha ciudad (Figura 18), se confirma que el desarrollo urbano ha sido erigido sobre suelos de origen volcánicos (zonas achuradas).

El desarrollo urbano de Manizales se ha extendido más en dirección NW-SE que en la dirección normal (NE-SW). Si bien la muestra estadística cubre la totalidad de las comunas, se observa que la localización de los puntos estudiados sigue preferentemente la orientación del eje mayor de crecimiento urbano de la ciudad (NW-SE), y más exactamente concentrados en el ancho del tercio medio del eje menor, en su longitud poblada (NE-SW). De esta forma, es apreciable que los estudios han sido realizados en la franja de mayor densidad poblacional y con mayor dinámica comercial y empresarial de la ciudad.

La edad de los estudios de suelos cae en la ventana de tiempo 2005 a 2020. La muestra estadística se distribuye por comunas conforme se ilustra en la Figura 19, enseñando que la mayor concentración de puntos estudiados la comparten las comunas Palogrande y Estación (con 14 unidades), seguida de la comuna Cumanday con 10, y Atardeceres, La Fuente, Ecoturístico Cerro de Oro con siete estudios en cada una de estas zonas. Los restantes nueve estudios geotécnicos se distribuyen en cinco comunas: Universitaria (3), Tesorito (3), Ciudadela del Norte (1), San José (1), La Macarena (1).



**Figura 19.** Diagrama de distribución de los puntos de muestreo de acuerdo con la comuna a la que pertenecen.

Los estudios geotécnicos consultados fueron realizados para soportar proyectos de ampliación, remodelación, renovación de licencia de construcción, adecuación y legalización de edificios de apartamentos, viviendas familiares, clínicas, entre otros. El *Anexo 1 – Base de datos*, contiene la compilación de información de localización y registros de perforación obtenidos para cada punto.

### 5.1 Descripción de muestras evidenciadas en la verificación en campo

Como se mencionó en el capítulo de metodología (numeral 4.4), se llevó a cabo un proceso de validación en campo cuyo análisis se referenció de acuerdo con la división del mapa del municipio de Manizales en cuatro zonas (NW, NE, SW y SE), teniendo como origen de coordenadas un punto arbitrario en el centro de la ciudad. A continuación, se describen las muestras que se evidenciaron en cada una de las zonas enunciadas:

- **Sector nororiental (NW).** El reconocimiento en campo fue practicado a seis sitios localizados en los barrios Chipre y La Francia, que forman parte de la comuna Atardeceres. Fue efectuada limpieza superficial del terreno y ejecutadas canaletas o calicatas de baja profundidad (Figura 20-A), para efecto de identificación de los sedimentos. Se comprobó que la capa superficial está dominada por granos de ceniza (Figura 20-B) y lapilli (Figura 20-C), de color pardo a amarillo, granulometría de limo a arcillas de plasticidad alta (Figura 20-D), humedad media (Figura 20-E) y resistencia variable entre media y alta. Las gradaciones de los depósitos son normales, y están compuestos principalmente por fragmentos de pómez, líticos y minerales como cuarzo, plagioclasa, anfíbol, micas y minerales ferromagnesianos.

Los sedimentos particulados procedentes de caída piroclástica se depositan sobre la topografía preexistente, formando morfologías suaves (Figura 20-F), crestas redondeadas y laderas cóncavas – convexas. En el sector de La Francia predominan depósitos con tamaño lapilli, fragmentos de pómez más gruesos, que están en una proporción de 70 – 30% con respecto a los líticos (Figura 20-G). En algunos puntos de La Francia y, en el escarpe de Chipre se logró identificar el contacto de la capa de cenizas con suelos residuales de la Formación Manizales (Figura 20-H), y hacia el centro del

barrio Chipre se observó contacto con suelo residual correlacionable con la Formación Casabianca (Figura 20-I).



**Figura 20.** Registro fotográfico de las visitas de campo realizadas al sector nororiental de Manizales (barrios Chipre y La Francia, comuna Atardeceres). (A) Limpieza del terreno mediante calicatas de baja profundidad. (B) Granos de ceniza que dominan la capa superficial en el sector nororiental de Manizales. (C) Granos tamaño lapilli presentes en la capa superficial de los puntos visitados. (D) Cenizas de color pardo, grano fino y alta plasticidad. (E) Depósito de cenizas con humedad media. (F) Morfología suave por presencia de depósitos de caída piroclástica que se acomodan sobre la topografía existente. (G) Predominio de depósitos con tamaño. (H) Depósito de cenizas con humedad media. (I) Depósito de cenizas con humedad media, mostrando la interfaz entre el depósito de caída piroclástica superior y el suelo residual inferior.

lapilli en el barrio La Francia. (H) Suelo residual de la Formación Manizales, encontrado en el contacto de las capas de ceniza. (I) Contacto con suelo residual de la Formación Casabianca.

Pese a que los depósitos de la Formación Casabianca (Tscb) y la Formación Manizales (Tsmz) son marcadamente granulares gruesos, se pueden identificar diferencias en los mismos. La Formación Casabianca, al ser definida como un depósito de sedimentos volcánicos de grano grueso, está referida como suelo de naturaleza volcánica exclusivamente, con textura igual o menor a 7.6 cm (Tamiz 3”), y débilmente cementados. Por su parte, la Formación Manizales, al describirse como un depósito integrado por geomateriales fluviovolcánicos de alta compactación, conlleva mezcla de fragmentos de origen volcánico y fluvial, con textura variada que incluye sobretamaños (partículas mayores a 7.6 cm) y matriz arenosa. Este complejo registra mayor cementación que la formación Casabianca, debido al alto grado de compactación que tiene la Formación Manizales.

- **Sector suroccidental (SW).** En esta zona de la ciudad se tiene un punto de muestreo, ubicado en el barrio El Bosque de la comuna La Macarena, en un área rodeada de llenos principalmente. En taludes cercanos al sitio, donde se tomaron las muestras para el estudio, la capa superficial tiene presencia de algunas partículas de caída piroclástica embebidas en un lleno (Figura 21). De acuerdo con los registros de campo, las muestras extraídas en el punto exacto donde se realizaron los sondeos, corresponden a limos arenosos asociados a cenizas volcánicas.



**Figura 21.** Fragmentos de depósitos de caída piroclástica, embebidos en los llenos predominantes en la zona de muestreo.

- **Sector sureste (SE).** La visita de campo cercana al muestreo No. 27, se encuentra aislada del clúster de puntos localizado hacia la zona de Milán y Alta Suiza; consecuentemente, su análisis se hizo por separado. El mencionado punto 27 se encuentra en el barrio Marmato de la comuna Cumanday, y la revisión se efectuó en un talud frente a la estructura de la Chec, donde fue llevado a cabo el estudio inicialmente en el año 2008. En dicho sector, los depósitos de caída piroclástica se encuentran degradados a niveles orgánicos, por lo que no se hace muy evidente su presencia en la capa más superficial, pero se conservan pequeños fragmentos de pómez que infieren el aporte piroclástico de estos suelos en profundidad (Figura 22).



**Figura 22.** Registro fotográfico de la visita de reconocimiento al punto ubicado en el barrio Marmato – comuna Cumanday. (A) Talud ubicado frente a la estructura de la Chec en el barrio Marmato. (B) Muestra de ceniza donde se conservan pequeños fragmentos de pómez.

En los barrios Milán, Alta Suiza y Baja Suiza, ubicados en las comunas Palogrande y Ecoturístico Cerro de Oro, se realizó el reconocimiento en campo de siete sitios, evidenciando presencia de suelos volcánicos superficiales.

Hacia el sector de Milán, los depósitos de caída piroclástica son conformados por cenizas de grano fino y menor proporción de lapilli. El contenido de pómez es mayor en relación al contenido de líticos, y las capas están poco diferenciadas de los niveles orgánicos. No se observan contactos con rocas u otras unidades, lo cual podría sugerir mayores espesores de ceniza (Figura 23).



**Figura 23.** Registro fotográfico de puntos visitados en el barrio Milán, comuna Palogrande.

En el sector aledaño a la cancha del barrio Baja Suiza, predominan depósitos de lapilli con tamaño variable entre 20 y 30 mm, y el contenido de pómez es de aproximadamente un 80%, y 20% de minerales líticos. Estos depósitos presentan baja plasticidad, humedad y resistencia medias (Figura 24).



**Figura 24.** Sector aledaño a la cancha de Baja Suiza, comuna Ecoturístico cerro de oro, donde predominan depósitos de lapilli.

En proximidades a la fábrica de Mabe en el barrio Alta Suiza, se identificó el corte de un talud donde se evidencia la depositación de materiales volcánicos tras diferentes eventos eruptivos, separados por la presencia de un paleosuelo.

Hacia la base del talud predominan capas de ceniza con un contenido de pómez de 50 a 60%, y granulometría entre limos y arenas gruesas. Se observa que la gradación de las capas es inversa, ya que hay predominio de fragmentos más gruesos hacia la parte superior. Suprayaciendo esta capa, se tiene un paleosuelo que, aunque presenta poco desarrollo de material orgánico, marca un fuerte cambio de procesos efusivos. Sobre el paleosuelo se aprecia una capa de lapilli grueso, de color amarillo, plasticidad baja, resistencia media, y un mayor contenido de pómez (70-80%) y de minerales ferromagnesianos (Figura 25).



**Figura 25.** Corte de talud cercano a la fábrica de Mabe en el barrio Alta Suiza, donde se evidencia la ocurrencia de diferentes eventos eruptivos, por la depositación de las capas de ceniza.

En el sector de Túnel de la 52, el cual se encuentra localizado en la comuna Estación, cerca del barrio San Jorge, se corrobora también la presencia de depósitos superficiales de caída piroclástica, de colores amarillentos que destacan con respecto a la capa orgánica más superior (Figura 26-a), cuyo tamaño de grano es medio (Figura 26-b), tienen plasticidad y humedad media.



**Figura 26.** Depósito superficial de ceniza volcánica en la zona del Túnel de la 52, comuna Estación.

Descendiendo en la ladera, hacia el oeste del punto anterior, y también en la comuna Estación, una vez más se verifica la existencia de depósitos de caída piroclástica, que en su capa superior se encuentran mezclados con la materia orgánica, sin embargo, se logran diferenciar granos de color pardo, correspondientes a ceniza volcánica (Figura 27).



**Figura 27.** Granos de ceniza embebidos en capa superficial de materia orgánica, comuna Estación.

Avanzando hacia el occidente dentro de la misma región de puntos (SE), se realizó la verificación de los geomateriales superficiales existentes en un talud frente a la Universidad Autónoma de Manizales, en la comuna Estación. En esta ocasión la ceniza se evidencia a menor profundidad, y se observan tonalidades más rojizas, granos muy finos, con alta plasticidad (Figura 28).



**Figura 28.** Ceniza volcánica con tonalidad rojiza y alta plasticidad, localizada en el área de la Universidad Autónoma de Manizales.

Para finalizar el recorrido por el sector sureste (SE), se tomó un punto en un talud expuesto en zona residencial de la Avenida Paralela con calle 40, es decir, en la comuna La Fuente, donde se encontraron cenizas volcánicas en la capa superficial, de una textura más granular, con menor plasticidad (Figura 29).



**Figura 29.** Ceniza volcánica de textura granular en zona de la Avenida Paralela con calle 40, comuna La Fuente.

- **Noreste (NE).** En este sector se tienen pocos puntos, los cuales están localizados en su mayoría en la comuna Estación, uno en la comuna San José, y uno en la comuna Ciudadela Norte.

De conformidad con lo verificado en el área urbana de Manizales, en esta región también se evidencia la presencia de ceniza volcánica en la capa superficial. Es así como cerca de la Avenida Kevin Ángel, en la misma línea del Túnel de la 52, se verificó un punto en el barrio Asunción, donde las partículas de ceniza tienen granos muy pequeños, con presencia de pómez, cuarzo y anfíboles (Figura 30). Mientras tanto, en un punto superior dentro de la misma ladera, se tiene mayor presencia de lapilli (Figura 31). Finalmente, en la comuna San José, hay un importante afloramiento de la Formación Casabianca

(Figura 32), que como se describió anteriormente, corresponde a sedimentos volcánicos de grano grueso, débilmente cementados.



**Figura 30.** Ceniza volcánica en el barrio Asunción, de grano pequeño, con presencia de pómez, cuarzo y anfíboles.



**Figura 31.** Presencia de lapilli en formación superficial cercana al barrio Asunción.



**Figura 32.** Afloramiento de Formación Casabianca en la comuna San José.

La Tabla 9 contiene datos sobre tamaños de grano identificados en los recorridos de campo, de acuerdo con la clasificación esbozada por Murcia et al. (2008), la cual define rangos de diámetro para cada tamaño volcánico. Aquí se observa que las muestras encontradas en la ciudad, van desde lapilli grueso hasta cenizas finas.

**Tabla 9.** Identificación en campo de los diferentes tamaños volcánicos de las formaciones superficiales de caída piroclástica visitadas en la ciudad de Manizales.

<i>Límite del diámetro de la partícula</i>	<i>Tamaño volcánico</i>	<i>Identificación en campo</i>
2048 mm – 64 mm	Bloque grueso	
64 mm – 16 mm	Lapilli grueso	 (SE) Baja Suiza  (NE) Asunción

<i>Límite del diámetro de la partícula</i>	<i>Tamaño volcánico</i>	<i>Identificación en campo</i>
16 mm – 4 mm	Lapilli medio	 (SE) Alta Suiza, Mabe
4 mm – 2 mm	Lapilli fino	 (NW) La Francia
2 mm – 1 mm	Ceniza muy gruesa	 (SE) Alta Suiza, Mabe
1 mm – 1/2 mm	Ceniza gruesa	 (NW) Escarpe de Chipre  (SE) Milán, mirador de Niza
1/2 mm – 1/4 mm	Ceniza media	 (NW) Chipre  (SE) Marmato, Chec  (SE) San Jorge

<i>Límite del diámetro de la partícula</i>	<i>Tamaño volcánico</i>	<i>Identificación en campo</i>
1/4 mm – 1/8 mm	Ceniza fina	 (SW) Milán
		 (SE) San Jorge
		 (NE) Asunción
1/8 mm – 1/16 mm	Ceniza muy fina	 (SE) Universidad Autónoma
		 (SE) Avenida Paralela, calle 40
1/16 mm – 1/512 mm	Ceniza extremadamente fina	

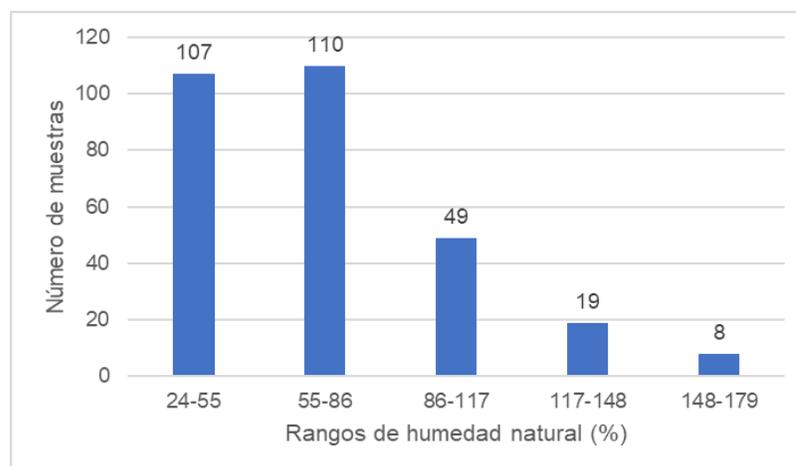
## 5.2 Caracterización de suelos con base en pruebas de laboratorio

La muestra estadística de 68 estudios geotécnicos correspondientes a igual número de sitios, contiene datos de 293 muestras de ceniza, e información relativa a profundidad, descripción en registros de campo, N.A.F., golpes de SPT (en 262 muestras), humedad natural, Límites de Atterberg, porcentaje de finos (pasa tamiz No. 200, clasificación S.U.C.S., pesos unitarios húmedo y seco, y resistencia a la compresión inconfinaada (*Anexo 2 – Resultados de laboratorio*)).

Con base en esa información de laboratorios de suelos disponible, se determinaron las propiedades índices no incluidas en los estudios originales.

### 5.2.1.1 Contenido de humedad – $W_n$ (%)

La Figura 33 presenta el diagrama de barras que enseña la distribución del contenido de humedad de las 293 muestras, de acuerdo con cinco intervalos establecidos según los valores mínimos y máximos encontrados. Esta variable de estado oscila entre 24,6 y 177,6% para la totalidad de las muestras; aun cuando el mayor número de muestras presentan una humedad en el rango de 24 a 86% (217 muestras).



**Figura 33.** Diagrama de barras con los rangos de distribución de la humedad natural para la totalidad de muestras analizadas.

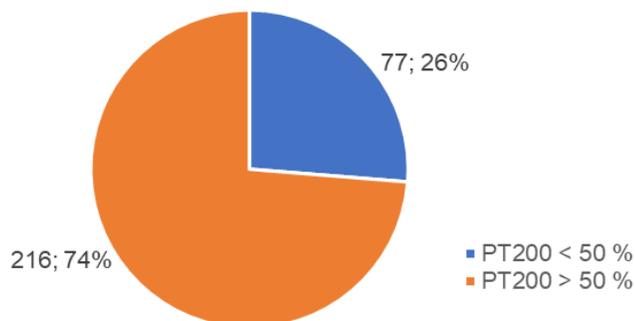
La humedad natural es una variable dependiente no sólo de la naturaleza del geomaterial sino también de las condiciones meteorológicas prevalentes en el área de estudio al momento de hacer el muestreo. El valor promedio de la humedad fue de 70,1%, 105 muestras de ceniza presentaron una humedad superior al promedio y 188 revelaron una humedad menor al promedio.

### 5.2.1.2 Porcentaje de finos (PT200)

La torta presentada en la Figura 34 ilustra la distribución de las muestras en cuanto a la fracción de finos combinados menores a 0,075 mm (porcentaje que pasa el tamiz #200) existente en cada una. De conformidad con lo dispuesto en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, para establecer el carácter grueso o fino de una masa de suelo en

función del porcentaje de las partículas que pasan el tamiz #200, se tiene que en 216 muestras de las 293, el porcentaje que pasa este tamiz es superior al 50%, equivalente al 74% de las muestras analizadas. Esto significa que el suelo base de análisis en la presente investigación es predominantemente fino.

Del total de muestras de suelos con información para el proyecto, 26,28% (77 especímenes) califican como suelo grueso (en ellos, el material retenido sobre el tamiz #200 es superior al 50%) y por consiguiente incluyen texturas de gravas y arenas. La fracción fina contenida en las 77 muestras de suelo grueso, fue superior al 12%, calificándolos como suelos granulares pobremente gradados, posiblemente limoso o arcilloso.

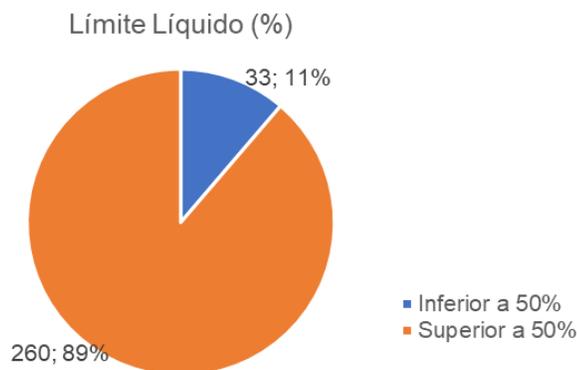


**Figura 34.** Diagrama de la distribución de las muestras con respecto al porcentaje que pasa el tamiz #200 (superior o inferior al 50%).

El porcentaje promedio del material que pasa el tamiz #200 en la totalidad de las muestras es del 65%, confirmando que el mayor número de ellas corresponde a suelo fino.

### 5.2.1.3 Límites de Atterberg

- **Límite Líquido (%).** El Límite Líquido de las muestras oscila entre 34 y 203%, con un promedio de 85%. Esta humedad de consistencia describe el grado de compresibilidad del suelo. En la Figura 35 se destaca que el 89% de las muestras (260 de 293) es de alta compresibilidad ( $LL > 50\%$ ) contra el 11% (33 de las 293 muestras) que es de compresibilidad baja a media ( $LL < 50\%$ ).



**Figura 35.** Diagrama distribución de las muestras respecto al grado de compresibilidad definido por el Límite Líquido.

- Límite Plástico (%).** El Límite Plástico de las muestras exhibe un promedio de 60%, con valor mínimo de 29% y máximo de 162%. La mayoría de las muestras (185) se encuentran por encima del promedio y las 108 restantes por debajo de él. Este contenido de humedad corresponde al límite inferior del rango de humedades de moldeo del suelo determinado por el Índice de Plasticidad y define el Índice de liquidez, comúnmente utilizado junto con el contenido de humedad natural para evaluar la consistencia *in situ* y el grado de consolidación del geomaterial.
- Índice de Plasticidad (%).** Este parámetro varía entre 3,5 y 89,6%, con un promedio de 25,6%, y su valor numérico establece el rango de humedades en los que es posible moldear los suelos cohesivos. Cuando la humedad natural está por debajo de este rango, el suelo se comporta como un geomaterial semisólido, y si está por encima, su comportamiento es el de un material viscoso. La plasticidad (capacidad del suelo cohesivo de aceptar deformación permanente) es un parámetro descriptor de la expansividad del suelo y es dependiente de la cantidad y calidad de los minerales de arcilla. La Tabla 10 condensa la distribución del grado de plasticidad de las muestras de suelo analizadas, y allí se observa que la totalidad de ellas registran plasticidad baja a alta, con predominio de altas plasticidades (107 de 293).

**Tabla 10.** Rangos de Índice de Plasticidad para las muestras analizadas.

IP%	Descripción	# de muestras	%
0 - 3	No plástico	0	0
3 - 15	Ligeramente plástico	91	31,1
15 - 30	Baja plasticidad	95	32,4
> 30	Alta plasticidad	107	36,5

### 5.2.1.3.1 Correlaciones a partir de Límites de Atterberg

- **Límite de Contracción (%).** Este valor se calculó a partir de los datos de Índice de Plasticidad y Límite Líquido, de acuerdo con la metodología gráfica mencionada en el fundamento teórico (Figura 12). Sus resultados oscilan entre 20,7 y 87,2%, indicando que la totalidad de muestras analizadas tienen un potencial de expansión bajo ( $LC > 13\%$ ), lo cual es coincidente con uno de los rasgos de los suelos volcánicos.
- **Índice de Liquidez.** Este índice da una noción del grado de consolidación del suelo y del estado de consistencia del geomaterial al momento del muestreo. La Figura 36 señala que el 80% de las muestras (235) registraron consistencia plástica *in situ* y revelan una historia de esfuerzos de material subconsolidado; por su parte, 54 especímenes (19%) exhibieron consistencia semisólida al momento del muestreo y tales suelos revelan una historia de esfuerzos de material sobreconsolidado o normalmente consolidado. Cuatro muestras mostraron consistencia líquida o viscosa durante la exploración.

Estado del suelo según su Índice de Liquidez



**Figura 36.** Estado de las muestras de suelo según su Índice de Liquidez.

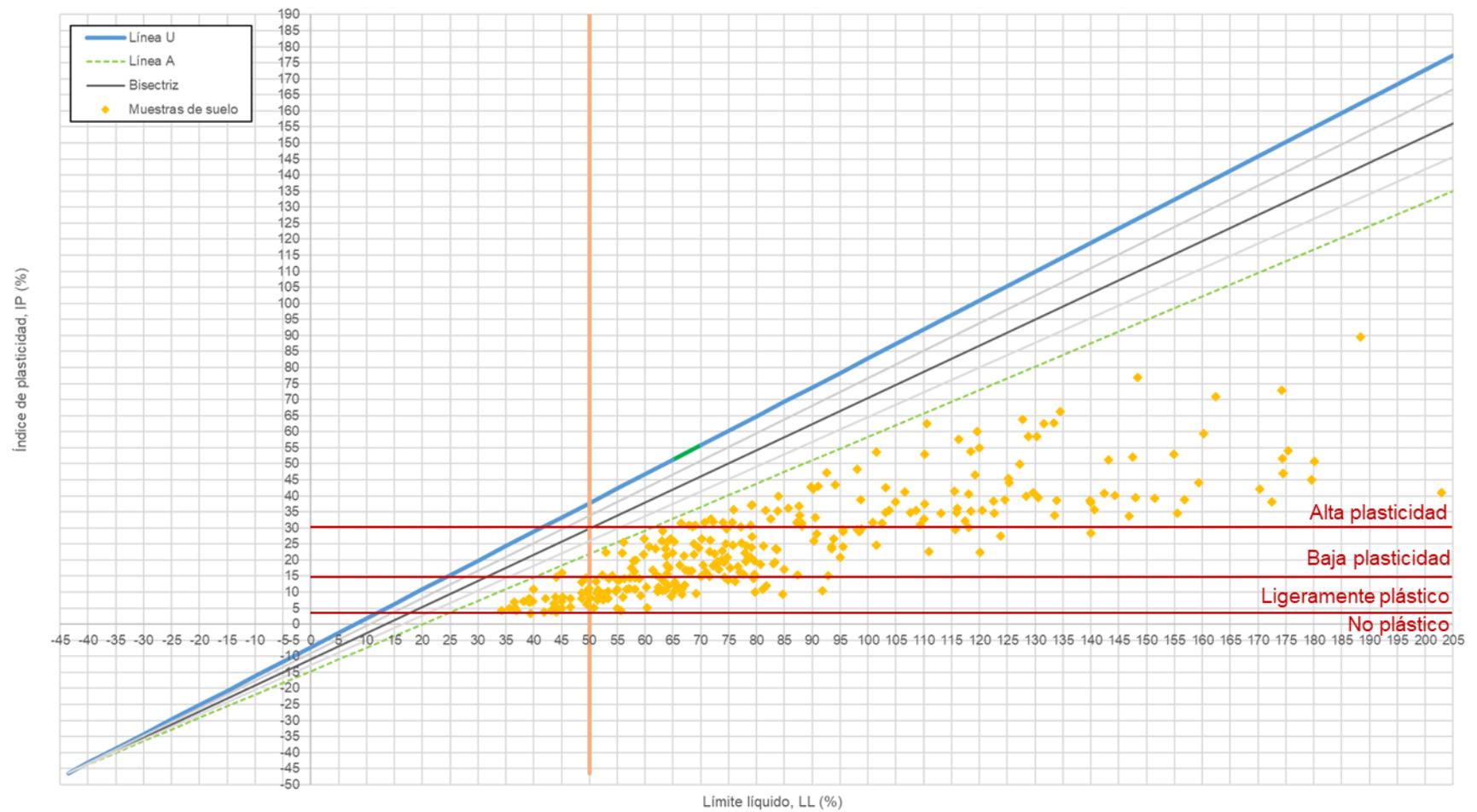
#### 5.2.1.4 Carta de plasticidad de Casagrande

En la Carta de Plasticidad de Casagrande (1948) modificada por Mitchell (1977) se situaron los datos (LL, IP) de la fracción fina de la totalidad de las muestras, habida cuenta que aún las masas de suelo clasificadas como gruesos, contenía una fracción de finos superior al 12% y hubo necesidad de corroborar la clasificación de estos para dar la nomenclatura apropiada a cada muestra.

En la Figura 37 se muestra que la totalidad de los puntos correspondientes a las coordenadas (LL, IP) se ubicaron debajo de la Línea A, significando que se trata de suelos finos limosos (M). En términos de compresibilidad, correlacionable con el valor de Límite Líquido de las muestras, el 88,73% de la fracción fina clasificó como limos de alta compresibilidad (LL>50%) y por consiguiente se identifican como MH, y el 10,58% de la fracción fina clasificó como limos de baja compresibilidad (LL<50%), identificados como ML. Por su parte, en términos de la caracterización de plasticidad en función de su Índice de Plasticidad (regiones delimitadas por las líneas horizontales que cortan el eje de las ordenadas), el 31,1% de la fracción fina clasificó como ligeramente plástico, el 32,4% se ubicó en el área de baja plasticidad, y el 36,5% en la región de alta plasticidad.

La región en la que se ubicaron los puntos guarda relación con la Figura 11, que presenta la Carta de Plasticidad de Casagrande modificada por Wesley (2010 en Galvis, 2018), quien señala que los suelos asociados a cenizas volcánicas, son clasificados como MH principalmente.

Carta de plasticidad de Casagrande



**Figura 37.** Ubicación de las muestras en la Carta de Plasticidad de Casagrande.

### 5.2.1.5 Resistencia a la compresión inconfiada

El valor de resistencia a la compresión inconfiada tiene un promedio de 99,4 KN/m<sup>2</sup>, y sus resultados oscilaron de 7,1 KN/m<sup>2</sup> a 373,6 KN/m<sup>2</sup>. La Tabla 11 ilustra que el 86% de las muestras presentan, en términos de la resistencia mecánica mencionada, una consistencia media a firme: 142 muestras son de consistencia media y 109 muestras de consistencia firme.

**Tabla 11.** Consistencia de las muestras de acuerdo con su resistencia a la compresión inconfiada.

Consistencia	Qu (KN/m <sup>2</sup> )	# de muestras	%
Muy blanda	0 – 25	4	1
Blanda	25 – 50	25	9
Media	50 – 100	142	48
Firme	100 – 200	109	37
Muy firme	200 – 400	13	4
Dura	> 400	0	0

## 5.3 Zonificación de datos y cartografía en carta de Plasticidad de Casagrande

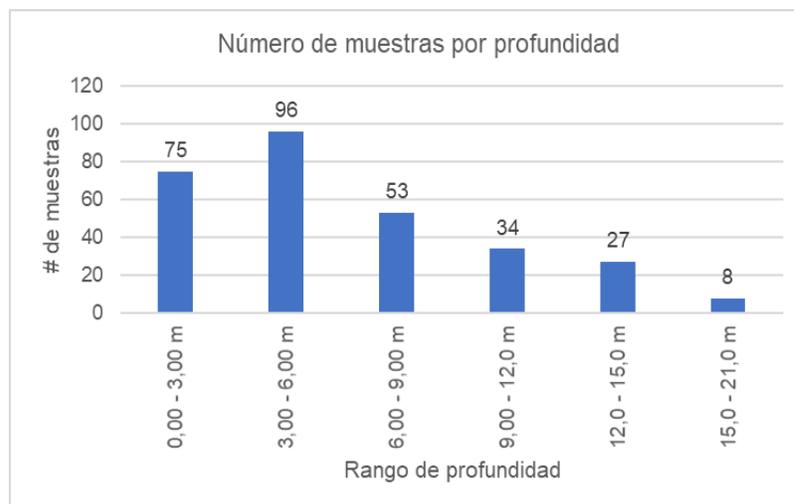
Evaluados los resultados de Límites de Atterberg y la resistencia a la compresión inconfiada, agrupados y descritos en numerales previos del presente capítulo, se realizó comparación gráfica bajo distintos criterios (profundidad, clasificación en el Sistema Unificado – SUCS –, número de golpes del ensayo SPT), independientemente de su localización espacial dentro de la ciudad, para llevar a cabo el análisis del grado de correlación de las variables involucradas.

### 5.3.1 Criterio: Profundidad de extracción de la muestra

La totalidad de las muestras (293), fueron evaluadas según el rango de profundidad a la que fueron tomadas (de 1 a 20 metros). Los datos fueron agrupados por muestreo en tramos de tres metros de profundidad en los primeros 15m (para un total de 5 grupos) y un grupo de 15 a 21m; de esta manera fueron establecidos seis (6) grupos, correspondientes a las profundidades 0 a 3m, 3 a 6m, 6 a 9m, 9 a 12m, 12 a 15m y 15 a 21 m.

El diagrama de barras de la Figura 38 ilustra la distribución de las muestras, donde se aprecia que 224 se concentran en los primeros nueve (9) metros de profundidad de exploración, 61

muestras corresponden al rango de profundidad de 9 a 15 metros, y 8 muestras fueron extraídas del rango de profundidad de 15 a 21 metros.



**Figura 38.** Distribución de muestras por rango de profundidad.

En lo que sigue (literal 5.3.1.1), se presentan los datos y correlaciones obtenidas para las muestras en el rango de profundidad 0 a 3m. En forma similar, en el *Anexo 3 – Resultados para muestras entre 3 y 21 metros de profundidad*, se presentan los datos y correlaciones correspondientes a los restantes rangos de profundidad.

### 5.3.1.1 Muestras de cero a tres metros de profundidad

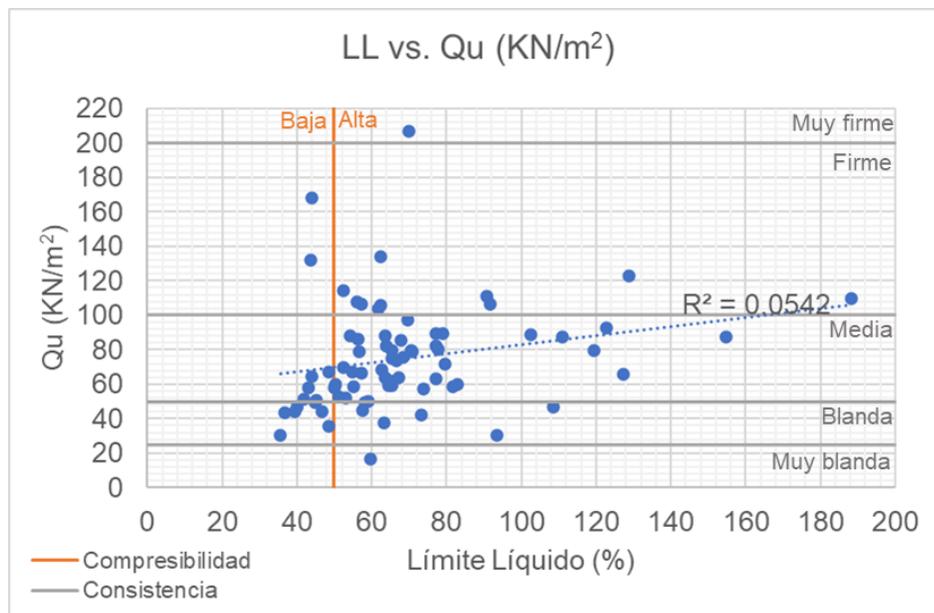
En la Tabla 12 se presenta el resumen de los resultados obtenidos para las 75 muestras que se encuentran en este rango de profundidad. El Límite Líquido promedio es superior a 50% (69,2%), indicando que las muestras en su mayoría tienen alta compresibilidad, y su Índice de Plasticidad promedio es de 19%, lo cual se asocia a baja plasticidad. Por su parte, la resistencia última del ensayo de compresión inconfiada, exhibe un promedio de 75 KN/m<sup>2</sup>, correlacionable con una resistencia media. Para este parámetro, se tiene que las muestras oscilan entre 16,8 KN/m<sup>2</sup> y 206,6 KN/m<sup>2</sup>, es decir, son de consistencia variable entre muy blanda y muy firme.

**Tabla 12.** Límites de Atterberg y resistencia a la compresión inconfínada para muestras de cero a tres metros.

# Muestra	Prof. (m)	LL (%)	IP (%)	Qu (Ton/m <sup>2</sup> )	Qu (KN/m <sup>2</sup> )
2	1,5	56,6	10,8	8,1	79,2
8	1,5	64,6	26,7	6,0	59,2
20	1,5	122,7	34,5	9,4	92,4
23	2	79,6	15,6	7,3	72,0
27	3	61,9	23,6	10,6	103,9
32	1,5	63,6	10,7	6,5	63,8
33	1,5	65,4	10,4	7,6	74,8
35	1,5	67,1	12,2	6,5	63,9
42	2	110,9	22,6	8,9	87,3
43	2,5	81,8	11,9	6,0	58,5
44	1,5	77,1	16,2	9,1	89,2
49	3	70,0	14,9	21,1	206,6
51	3	71,0	16,2	8,0	78,8
77	2	46,6	7,9	4,5	44,4
78	1,5	43,1	4,3	5,9	58,2
80	1,5	48,6	8,1	3,6	35,6
83	1,5	62,3	10,2	13,7	134,1
84	3	65,4	13,2	8,1	79,8
90	1,5	54,8	10,3	6,8	67,2
92	1,6	55,0	4,9	6,0	58,7
93	1,5	83,0	19,0	6,1	60,1
94	1,5	77,7	15,6	8,2	80,3
138	1,5	65,5	12,2	6,1	59,5
147	1,5	57,2	11,2	10,9	106,4
154	1,5	91,8	10,4	10,9	106,6
156	1,5	52,4	9,4	11,6	114,1
158	1,5	43,6	6,5	13,5	131,9
159	3	56,3	14,3	8,8	86,1
168	1	45,1	7,2	5,2	50,5
169	1,2	62,4	11,5	10,8	105,6
171	1	62,6	14,7	7,0	68,5
172	3	63,9	18,5	8,4	82,0
174	1,5	102,5	31,6	9,1	88,9
176	3	77,3	25,3	8,4	82,3
182	2	53,0	22,5	5,3	51,8
187	1,5	67,7	16,7	8,7	85,4
189	2	73,8	22,9	5,8	57,3
191	2	43,9	8,5	6,6	64,5
200	2,3	48,6	9,7	6,9	67,3
206	3	108,6	35,6	4,8	47,0
208	2	154,8	52,9	8,9	87,4
209	2	58,2	14,3	5,1	49,7
210	1,5	51,3	9,8	5,4	53,0
211	2,5	59,0	14,1	5,1	49,9
212	1,2	93,5	24,1	3,1	30,3
213	2	57,2	14,3	6,7	66,2
214	3	119,5	60,0	8,1	79,5
215	1,6	68,4	16,6	7,7	75,9
218	3	63,6	23,6	9,0	88,3
222	3	52,3	15,4	7,1	69,5
226	2,5	77,2	30,4	6,5	63,5
229	3	70,7	31,7	8,1	79,4

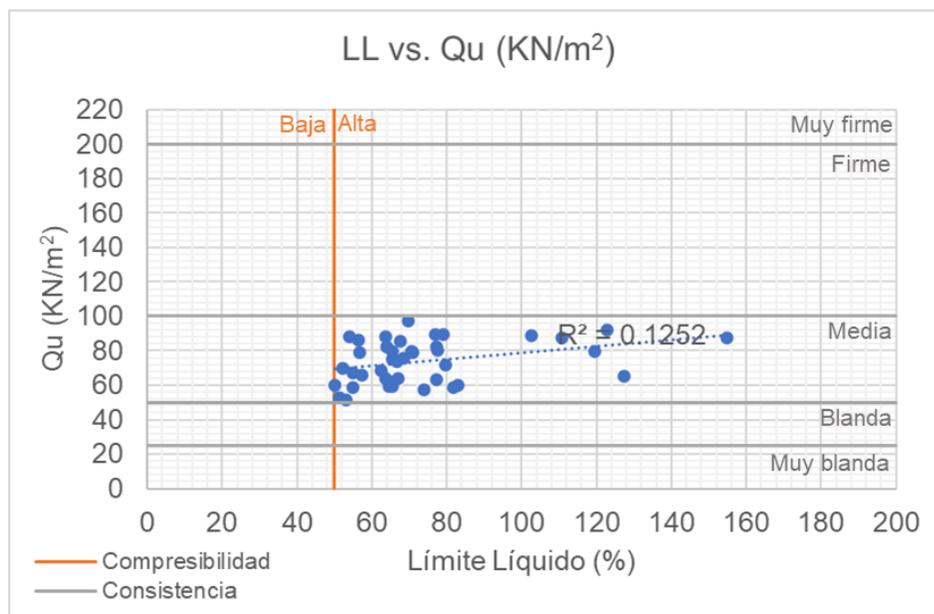
# Muestra	Prof. (m)	LL (%)	IP (%)	Qu (Ton/m <sup>2</sup> )	Qu (KN/m <sup>2</sup> )
234	3	41,9	3,8	5,2	51,5
238	3	128,8	58,6	12,5	122,7
247	1,5	49,9	11,2	5,9	57,7
249	1,5	69,7	23,7	9,9	97,5
251	2	54,1	15,0	9,0	87,9
252	2	79,0	20,9	9,1	89,6
253	2	127,2	50,0	6,7	65,5
257	3	66,6	10,8	7,5	73,5
259	3	50,2	8,2	6,1	59,8
262	3	36,7	5,1	4,4	43,3
265	2,2	73,2	17,1	4,3	41,9
267	2,4	45,0	16,0	5,1	49,7
268	1,5	63,2	29,1	3,8	37,6
269	1,5	40,0	11,0	4,8	46,6
270	1,5	44,1	3,7	17,1	168,1
271	2,3	56,1	25,6	11,0	108,1
276	2,5	59,7	21,7	1,7	16,8
277	2	65,0	22,2	6,3	61,8
279	3	90,8	28,1	11,3	110,8
282	3	39,3	6,8	4,5	44,1
286	2,5	57,6	17,5	4,6	45,1
287	3	35,6	5,0	3,1	30,4
290	2	188,4	89,6	11,2	109,8
Promedio		69,2	18,9	7,6	74,9
Mínimo		35,6	3,7	1,7	16,8
Máximo		188,4	89,6	21,1	206,6

En la Figura 39 se grafican los puntos correspondientes a profundidades de cero a tres metros, donde en el eje de las abscisas encontramos el Límite Líquido (%) y en las ordenadas la resistencia a la compresión inconfiada (KN/m<sup>2</sup>). El 80% de las 75 muestras evaluadas, presenta compresibilidad alta, asociada a un Límite Líquido superior a 50%. Así mismo, la consistencia en función de la resistencia a la compresión inconfiada, se describe como media para el 63% de las muestras (entre 50 y 100 KN/m<sup>2</sup>) y blanda para el 19% (entre 25 y 50 KN/m<sup>2</sup>). Es así como se evidencia que el mayor porcentaje del total de las muestras (55%, es decir, 41 de 75 muestras), se concentra en un rango de compresibilidad alta, con consistencia media. Esta revisión por área obedece al hecho de que las muestras no se ajustan a una correlación lineal o exponencial; en la gráfica se observa que, en el caso de la correlación lineal, su regresión es sumamente baja (0.0542).



**Figura 39.** Gráfico de dispersión de las muestras entre cero y tres metros para Límite Líquido (%) vs. Qu (KN/m<sup>2</sup>).

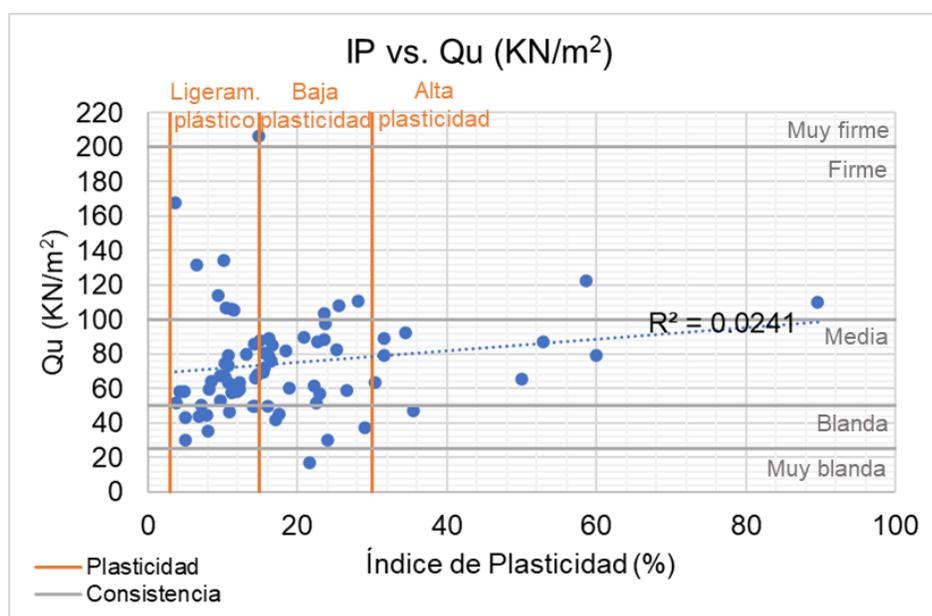
Es así como en la gráfica de la Figura 40 se extrae el área de mayor concentración de puntos, evidenciando que la regresión para una correlación de tipo lineal aumenta, pero se mantiene baja (0.1252).



**Figura 40.** Gráfico de dispersión para el área donde se concentra la mayoría de las muestras entre cero y tres metros, compresibilidad alta (LL > 50%) vs. consistencia media (RCI entre 50 y 100 KN/m<sup>2</sup>).

Para las variables de Índice de Plasticidad (%) y resistencia a la compresión inconfiada ( $\text{KN/m}^2$ ), se graficaron los puntos del mismo modo, reemplazando las abscisas, donde estaba el Límite Líquido (%), por el Índice de Plasticidad (%). En la Figura 41 se muestra la gráfica para dichas variables, y se evidencia una concentración de muestras con ligera (37 muestras con IP entre 3 y 15%, es decir, 49% del total) a baja plasticidad (28 muestras con IP entre 15 y 30%, es decir, 37% del total), la cual representa un 87% de las muestras evaluadas en un rango de cero a tres metros de profundidad.

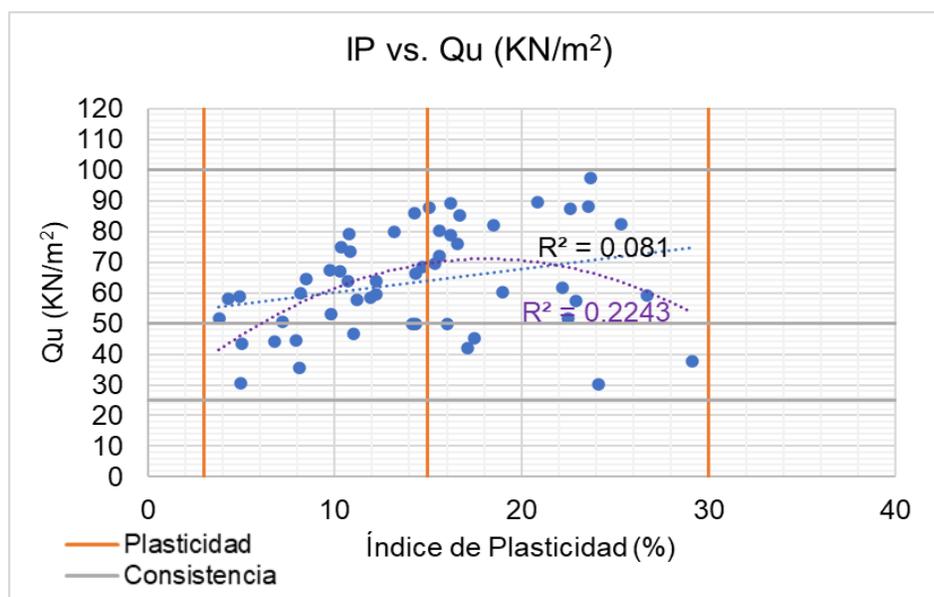
Al asociar las dos variables de Índice de Plasticidad (%) y resistencia a la compresión inconfiada ( $\text{KN/m}^2$ ), se evidencia una regresión baja para un tipo de correlación lineal (0.0241), por tal motivo, se extraerán las muestras del área con mayor concentración (53 muestras), para verificar si esta correlación, o algún otro tipo de correlación, se asemeja al comportamiento de los puntos.



**Figura 41.** Gráfico de dispersión de las muestras entre cero y tres metros para Índice de Plasticidad (%) vs.  $\text{Qu}$  ( $\text{KN/m}^2$ ).

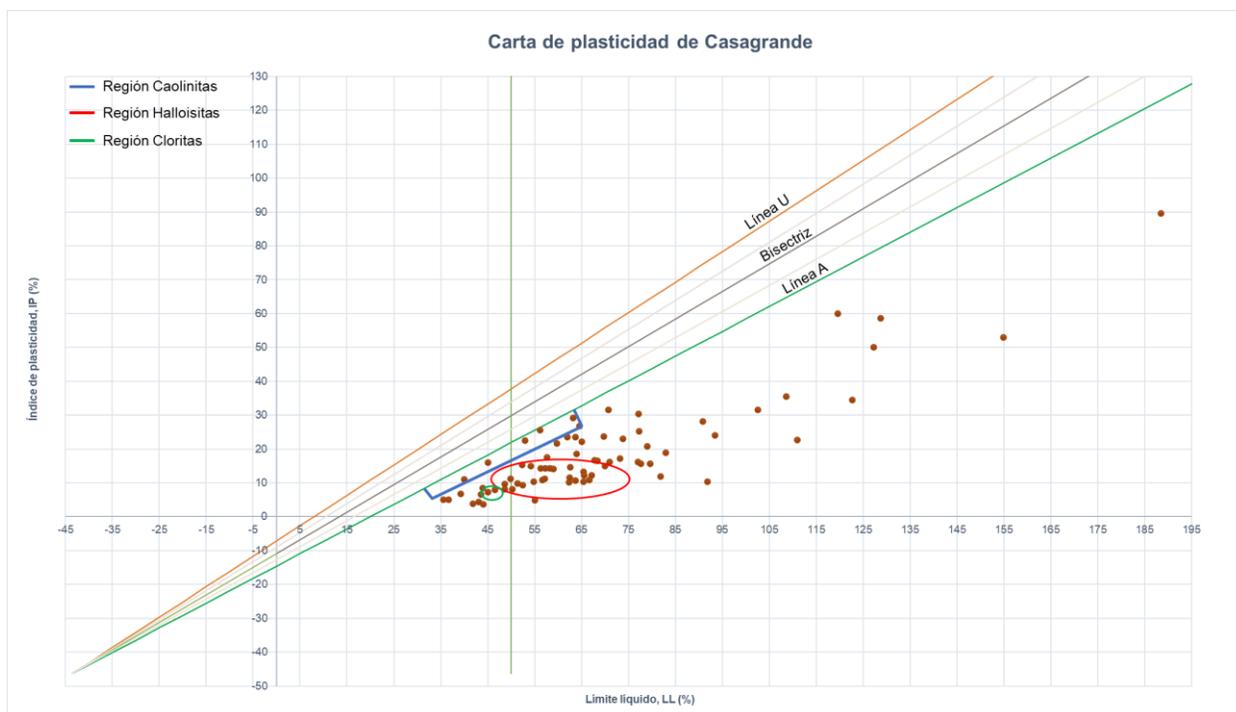
En la Figura 42, se ubican las 53 muestras mencionadas, y se presenta la regresión para una ecuación lineal (0.081), y para una ecuación polinómica de grado 2, ya que este es el valor

más alto identificado al revisar las otras regresiones (0.2243). Se evidencia que estos son muy bajos para pensar en alguna correlación típica de las muestras.



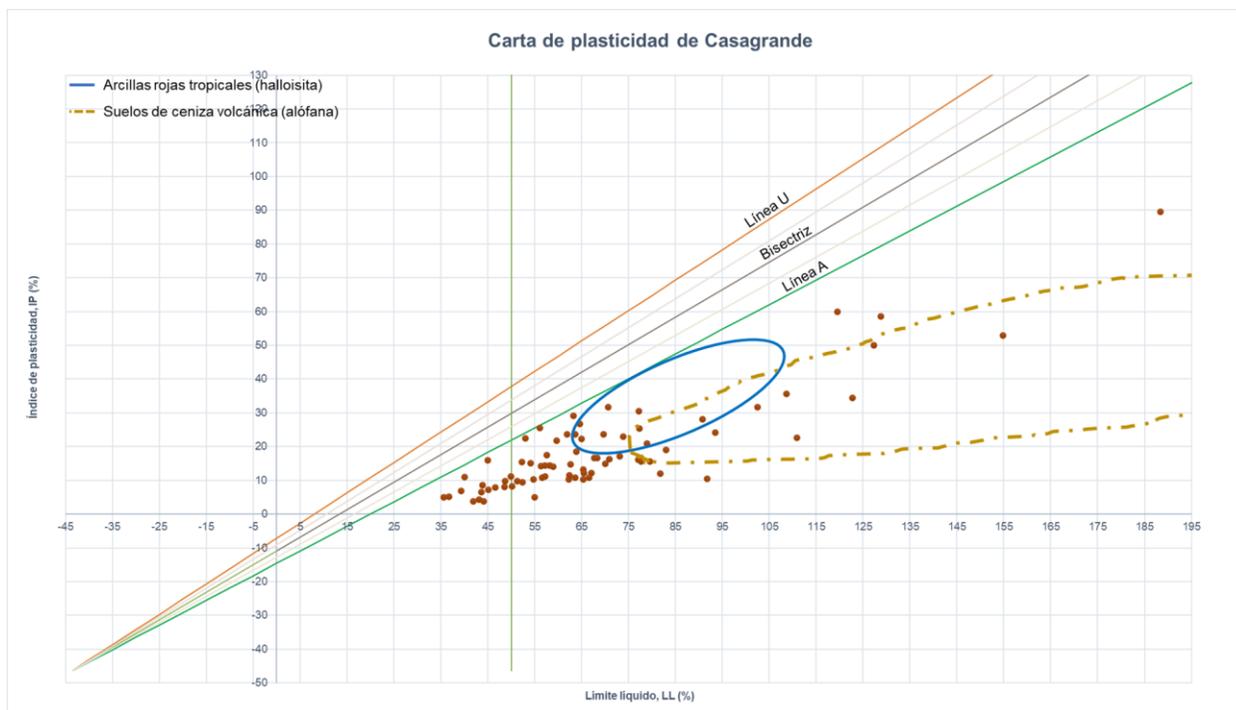
**Figura 42.** Gráfico de dispersión para el área donde se concentra la mayoría de las muestras entre cero y tres metros, plasticidad ligera y baja (IP entre 3 y 30%) vs. consistencia blanda y media (RCI entre 25 y 100 KN/m<sup>2</sup>).

Al localizar estas 75 muestras en la carta de plasticidad de Casagrande modificada por Mitchell en 1976 (Figura 43), se identifican tres regiones con minerales característicos asociados a caolinitas (área azul), halloisitas (área en rojo), y cloritas (área en verde). El 35% del total de muestras se encuentran en el área de las halloisitas (26 puntos), 8% en el área de las caolinitas (6 puntos), y 3% en el área de las cloritas (2 puntos). En la gráfica no se observa una concentración predominante hacia las regiones asociadas a alguno de los minerales mencionados, sin embargo, se evidencia que todas las muestras se localizan debajo de la línea A.



**Figura 43.** Carta de plasticidad de Casagrande modificada por Mitchell (1976), en la cual se localizan las muestras de cero a tres metros de profundidad.

Por su parte, en la Figura 44 se presenta la carta de plasticidad de Casagrande modificada por Wesley (1973, 2010), donde se adicionan dos áreas correspondientes a arcillas rojas tropicales asociadas al mineral de halloisita (encerrada en azul), y suelos de ceniza volcánica asociados a alófana (línea punteada). Dentro de la región de halloisita se tienen 10 muestras (13% del total), y para la región asociada a alófana, se tienen 12 muestras (16% del total), mientras que tres de ellas coinciden con las dos áreas. Se observa que la mayoría de las muestras no se concentran en las áreas demarcadas.



**Figura 44.** Carta de plasticidad de Casagrande modificada por Wesley (1973, 2010), en la cual se localizan las muestras de cero a tres metros de profundidad.

### 5.3.2 Criterio: Clasificación en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y resistencia a la compresión confinada

De las 293 muestras evaluadas, clasificadas en fuente según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), 212 corresponden a limos de alta compresibilidad (MH), 75 a arenas limosas (SM), cuatro a limos de baja compresibilidad (ML) y dos a arenas arcillosas (SC). En este sentido, y con miras a contar con suficientes datos para la correlación de variables, se descartaron las seis muestras que clasificaron como ML y SC.

#### 5.3.2.1 Limos de alta compresibilidad (MH)

En la Tabla 13 se enseñan los resultados asociados a las 212 muestras clasificadas como limos de alta compresibilidad (MH); estas muestras presentan un porcentaje de finos superior al 50%, un Límite Líquido superior a 50%, y se localizan debajo de la Línea A en la Carta de Plasticidad de Casagrande.

Este grupo de muestras revelan un Índice de Plasticidad de laboratorio con un amplio rango de valores (oscilando entre 9 y 90%), con promedio de 31%. Mayormente, las muestras califican como de alta plasticidad (alta capacidad de aceptar deformación permanente). Por su parte, la resistencia a la compresión inconfiada varía en el rango 17 y 373 KN/m<sup>2</sup>, con valor promedio de 108 KN/m<sup>2</sup>, son valores que describen materiales de in situ variando entre muy blanda a muy firme.

**Tabla 13.** Límites de Atterberg y resistencia a la compresión inconfiada para muestras clasificadas como limos de alta compresibilidad (MH).

# Muestras	Prof. (m)	LL (%)	IP (%)	Qu (Ton/m <sup>2</sup> )	Qu (KN/m <sup>2</sup> )
1	5	82,5	32,9	16,3	160,24
2	1,5	56,6	10,8	8,1	79,24
3	4	90,6	33,3	19,2	188,58
4	7,5	107,6	34,9	14,9	146,12
5	4,5	118,0	30,2	12,7	124,64
6	8	115,9	34,8	15,0	147,49
7	8	98,8	29,7	7,9	77,18
8	1,5	64,6	26,7	6,0	59,23
9	3,5	79,7	10,1	16,5	162,10
10	5	91,1	42,9	28,9	283,61
11	5	143,2	51,3	21,4	209,96
12	14	119,2	46,6	10,9	106,60
13	5	160,2	59,4	8,6	84,21
14	9	87,6	36,7	13,2	129,59
15	14	125,3	44,0	7,4	72,77
16	9	87,3	31,6	9,0	88,14
17	14	100,9	31,7	6,4	62,62
19	4,8	110,1	32,8	4,9	47,95
20	1,5	122,7	34,5	9,4	92,38
21	7	68,7	21,7	10,4	102,09
23	2	79,6	15,6	7,3	72,00
24	7	202,9	41,1	11,4	111,45
26	4	78,1	24,4	19,5	190,74
27	3	61,9	23,6	10,6	103,88
28	7	72,2	18,1	11,9	116,51
29	9	101,5	24,5	2,1	20,93
30	13	73,0	19,6	4,5	43,97
31	8	74,8	13,7	8,3	81,27
32	1,5	63,6	10,7	6,5	63,81
33	1,5	65,4	10,4	7,6	74,78
34	4,5	64,7	8,6	6,6	64,36
35	1,5	67,1	12,2	6,5	63,87
39	16	106,6	41,2	6,4	62,91
40	12	87,8	34,0	7,7	75,69
41	14	72,4	22,0	6,2	60,61
42	2	110,9	22,6	8,9	87,29
43	2,5	81,8	11,9	6,0	58,51
44	1,5	77,1	16,2	9,1	89,20
45	4,5	60,2	11,6	7,8	76,85

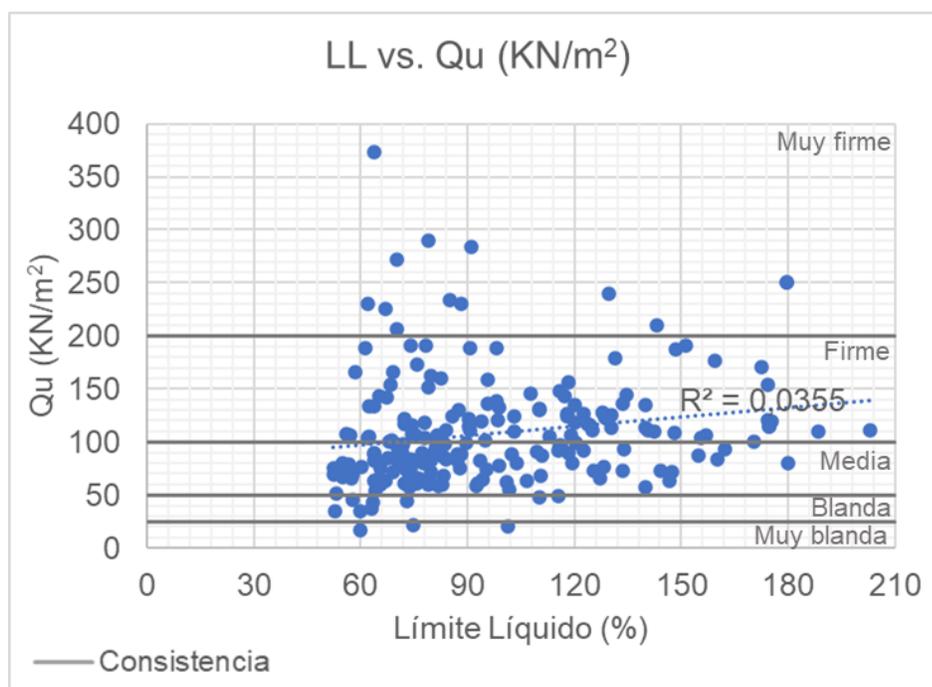
# Muestras	Prof. (m)	LL (%)	IP (%)	Qu (Ton/m <sup>2</sup> )	Qu (KN/m <sup>2</sup> )
46	3,5	79,5	14,3	6,7	65,32
47	7	75,3	17,6	6,7	65,23
48	6,5	76,1	13,3	6,8	66,24
49	3	70,0	14,9	21,1	206,57
50	7,5	70,5	18,4	9,2	89,78
51	3	71,0	16,2	8,0	78,82
52	5	83,3	19,2	6,9	67,61
53	4,5	81,1	10,9	10,4	101,51
56	4,5	87,3	15,4	8,4	82,06
57	8	147,5	52,0	7,4	72,20
58	8	140,0	37,9	11,6	113,51
60	8	130,5	39,4	12,7	124,82
62	5	52,7	9,5	3,5	34,42
63	9	83,4	23,4	8,8	86,12
64	11	64,1	11,9	5,5	53,79
66	12	94,9	21,0	10,4	101,91
67	16	71,6	14,9	8,6	84,42
68	20	120,5	35,6	10,2	99,65
70	10,5	79,1	24,0	8,4	81,93
71	14	83,7	23,4	10,0	98,00
73	8	79,1	27,2	15,5	151,77
74	12	88,1	31,4	9,1	88,84
75	20	133,9	38,5	9,5	93,07
79	4	78,5	20,5	8,3	81,56
82	4	52,4	9,2	7,7	75,28
83	1,5	62,3	10,2	13,7	134,13
84	3	65,4	13,2	8,1	79,83
85	4	120,0	55,0	12,1	118,47
86	7	174,4	51,7	15,7	154,11
87	4	180,1	50,8	8,2	80,49
90	1,5	54,8	10,3	6,8	67,17
93	1,5	83,0	19,0	6,1	60,14
94	1,5	77,7	15,6	8,2	80,32
96	10,5	69,2	9,5	7,3	71,59
97	12	170,3	42,2	10,3	100,81
98	7	71,5	22,6	8,7	85,71
99	11	124,5	38,9	11,9	116,41
100	13	172,4	38,1	17,4	171,03
101	6	129,7	41,1	24,5	239,97
102	8	179,6	44,9	25,6	250,86
103	10	174,5	47,0	11,7	115,13
104	12,2	74,0	31,8	19,5	191,03
105	5	61,4	16,9	19,3	189,07
106	5	123,8	27,4	12,0	117,19
107	6	74,5	25,1	11,9	116,21
108	6	70,2	26,6	27,7	271,74
109	7	77,9	22,2	12,1	118,66
110	9	98,5	28,8	12,3	120,13
111	15	88,1	30,5	23,5	230,75
112	18	110,2	37,5	13,5	131,90
113	6	120,1	22,5	13,8	134,94
114	15	117,4	32,1	14,6	143,57
115	18	118,4	35,3	16,0	156,71
116	9	93,8	26,7	12,2	119,94
117	15	140,6	35,7	11,3	111,11

# Muestras	Prof. (m)	LL (%)	IP (%)	Qu (Ton/m <sup>2</sup> )	Qu (KN/m <sup>2</sup> )
118	9	95,5	28,9	16,2	159,06
119	12	98,0	29,4	19,2	188,58
120	4	62,0	15,3	23,5	230,56
121	10	98,7	38,8	13,5	132,39
122	13	113,1	34,5	10,7	105,32
125	9	80,7	18,6	9,2	90,22
126	13	144,3	40,1	7,4	72,57
127	10	81,2	24,5	9,8	96,11
128	12	90,3	25,9	12,4	121,60
129	14	146,8	33,8	6,5	63,74
130	15	159,3	44,1	18,0	176,52
133	13	156,8	38,9	10,8	105,91
134	16	63,8	21,2	38,1	373,64
135	7	85,0	17,0	23,8	233,36
137	7	58,3	19,9	16,9	165,71
138	1,5	65,5	12,2	6,1	59,49
141	7,5	53,5	14,2	7,2	70,41
142	7,5	93,5	23,5	8,5	82,96
143	12,5	133,5	34,0	7,4	72,67
144	7	115,6	29,6	9,4	91,99
145	6	67,2	16,8	14,5	142,00
146	10	103,2	42,6	12,6	123,76
147	1,5	57,2	11,2	10,9	106,44
149	7	74,2	14,6	8,5	83,26
150	10	63,4	13,3	4,4	42,86
151	10	103,1	34,9	11,2	109,64
152	10	128,4	39,9	7,8	76,10
153	10	118,1	40,5	12,9	126,21
155	5	79,6	19,8	8,4	82,47
157	4	74,3	19,4	11,0	107,58
160	14	65,2	25,8	14,6	142,79
161	11	151,4	39,2	19,5	191,43
162	14	139,9	38,5	5,9	57,86
163	11	148,0	39,4	11,1	108,66
164	12	140,0	28,5	13,8	135,33
165	15,5	155,5	34,7	10,6	104,05
166	8	179,6	44,9	25,6	250,86
167	10	174,5	47,0	11,7	115,13
169	1,2	62,4	11,5	10,8	105,62
170	4	74,0	19,5	7,6	74,73
172	3	63,9	18,5	8,4	81,98
173	6	116,0	36,2	9,9	97,09
174	1,5	102,5	31,6	9,1	88,95
175	5	71,7	26,2	9,3	91,20
176	3	77,3	25,3	8,4	82,28
177	8	122,5	38,4	12,9	126,70
178	10	95,5	24,1	13,9	136,22
182	2	53,0	22,5	5,3	51,78
183	6	110,6	62,6	6,9	67,67
185	5	74,6	29,8	2,2	21,48
186	4	55,0	13,8	8,2	80,22
187	1,5	67,7	16,7	8,7	85,38
188	6	94,1	43,4	6,6	65,10
189	2	73,8	22,9	5,8	57,27
190	5	68,5	30,3	15,7	154,26

# Muestras	Prof. (m)	LL (%)	IP (%)	Qu (Ton/m <sup>2</sup> )	Qu (KN/m <sup>2</sup> )
193	8	95,5	29,6	7,5	73,83
195	6	75,8	24,5	6,3	61,36
196	9	125,2	45,5	11,4	111,52
199	9,7	90,2	42,2	11,7	115,11
201	8,2	57,9	19,7	7,0	69,01
207	5,1	69,1	30,8	16,9	166,02
208	2	154,8	52,9	8,9	87,36
213	2	57,2	14,3	6,7	66,18
214	3	119,5	60,0	8,1	79,53
216	4	72,9	18,6	7,4	72,49
217	4,5	103,8	35,6	8,1	79,88
218	3	63,6	23,6	9,0	88,26
219	9	75,9	35,7	17,7	173,11
220	12	71,9	32,7	10,0	97,98
221	15	98,0	48,3	14,1	138,16
222	3	52,3	15,4	7,1	69,51
223	6	92,6	47,2	6,0	58,39
224	12	142,4	40,9	11,2	109,52
225	15	79,1	37,0	29,5	289,53
226	2,5	77,2	30,4	6,5	63,48
228	10	133,4	62,8	13,9	136,60
229	3	70,7	31,7	8,1	79,39
230	6	83,9	39,9	11,4	111,56
231	9	134,4	66,2	14,7	144,36
232	12	110,2	53,1	13,3	130,24
233	15	116,2	57,5	9,9	97,28
236	12	89,8	42,8	10,1	98,80
238	3	128,8	58,6	12,5	122,72
239	9	130,3	58,5	11,6	113,86
240	13	79,1	37,4	6,4	62,76
241	6	162,3	70,9	9,6	93,71
242	9	174,3	72,9	12,2	120,13
243	15	72,2	31,9	12,4	121,39
244	7	148,4	76,8	19,1	187,58
245	6	73,7	20,0	7,3	71,66
246	9	127,8	63,8	13,1	128,14
248	5,5	63,9	15,8	9,2	89,83
249	1,5	69,7	23,7	9,9	97,48
250	4,5	67,0	21,2	22,9	224,97
253	2	127,2	50,0	6,7	65,54
255	6	175,4	54,0	12,2	119,49
256	9	83,8	35,2	8,5	83,31
258	9,5	92,8	15,1	6,3	61,37
260	6	79,0	30,9	6,1	59,99
261	12	109,4	31,0	9,2	90,62
263	9	78,0	19,5	10,6	104,20
264	6	115,5	41,4	5,0	49,45
268	1,5	63,2	29,1	3,8	37,56
271	2,3	56,1	25,6	11,0	108,07
272	3,1	101,5	53,6	5,6	55,11
273	4,3	67,9	30,8	10,2	100,42
274	6	59,9	26,6	3,6	35,30
276	2,5	59,7	21,7	1,7	16,77
277	2	65,0	22,2	6,3	61,78
278	5	81,6	35,4	10,8	105,91

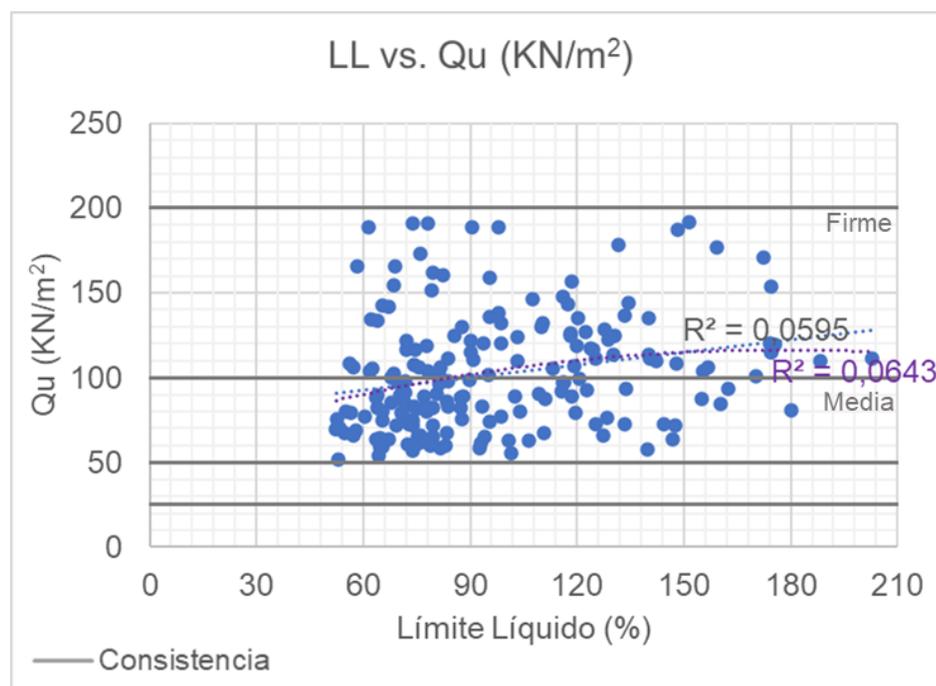
# Muestras	Prof. (m)	LL (%)	IP (%)	Qu (Ton/m <sup>2</sup> )	Qu (KN/m <sup>2</sup> )
279	3	90,8	28,1	11,3	110,82
286	2,5	57,6	17,5	4,6	45,11
288	6	118,5	53,9	9,1	89,24
289	4	131,6	62,5	18,2	178,48
290	2	188,4	89,6	11,2	109,84
291	5	75,6	31,7	10,8	105,91
292	4,2	63,9	25,5	13,6	133,37
293	3,5	85,7	36,1	12,7	124,55
Promedio		96,9	30,9	11,0	108,1
Mínimo		52,3	8,6	1,7	16,8
Máximo		202,9	89,6	38,1	373,6

La Figura 45 enseña la distribución de las 212 muestras clasificadas como MH (limos de alta compresibilidad) en términos de graficar el Límite Líquido (%) vs. la resistencia a la compresión inconfiada (KN/m<sup>2</sup>). Se evidencia que 100 de 212 muestras (47,17%) presentan valores de resistencia asociados a consistencia media, y 88 de 212 (41,51%) registran consistencia firme. Para este conjunto de muestras (188 de 212, es decir, para el 88,68%) la resistencia a la compresión inconfiada varió entre 50 y 200 KN/m<sup>2</sup>. Se aprecia que los puntos (LL, Qu) enseñan una distribución altamente dispersa; consecuentemente, la correlación entre las dos variables (ajuste por mínimos cuadrados para tendencia lineal) es extremadamente baja (0,0355%).



**Figura 45.** Gráfico de dispersión de las muestras clasificadas como limos de alta compresibilidad (MH) para Límite Líquido (%) vs. Qu (KN/m<sup>2</sup>).

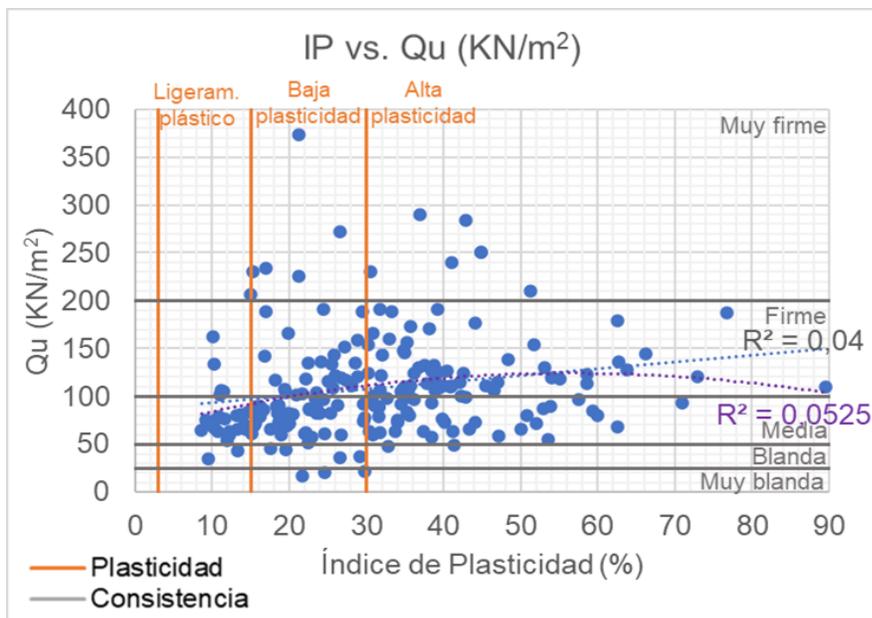
Al analizar solo las muestras de consistencia media a firme (el 88,68% del total, equivalente a 188 puntos), se observa que la regresión lineal revela un aumento ligero de correlación (0,0595%), y al tratar un ajuste a ecuación polinómica de grado dos, se tiene una regresión de 0,0643. Estos son valores muy bajos de correlación que ratifican la alta dispersión de los datos (Figura 46).



**Figura 46.** Gráfico de dispersión de las muestras clasificadas como limos de alta compresibilidad (MH) para Límite Líquido (%) vs. Qu (KN/m<sup>2</sup>), cuya consistencia varía entre media y firme.

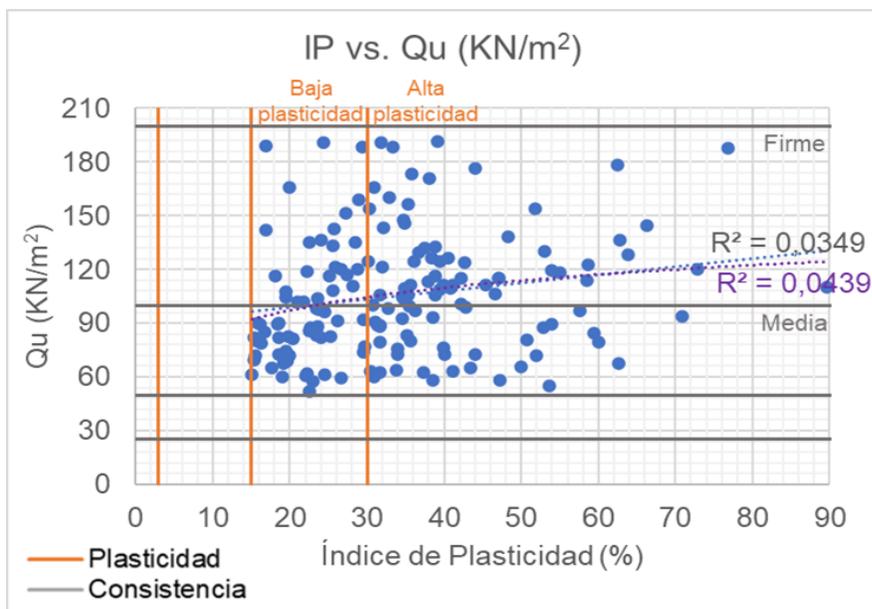
La Figura 47 relaciona el Índice de Plasticidad (%) en la abscisa vs resistencia a la compresión confinada (KN/m<sup>2</sup>), en la ordenada. Se aprecia que 104 de 212 muestras (49% del total) son de alta plasticidad, el 37% (79 muestras) tiene baja plasticidad y 14% (29 muestras) corresponden a sedimentos de ligera a muy baja plasticidad.

La relación entre las variables (IP vs Qu) muestra regresión de tendencia lineal (0,04) y de tendencia polinómica de grado dos (0,0525) muy bajas. Se hizo consecuentemente, una revisión a 162 muestras localizadas en el área con mayor concentración.



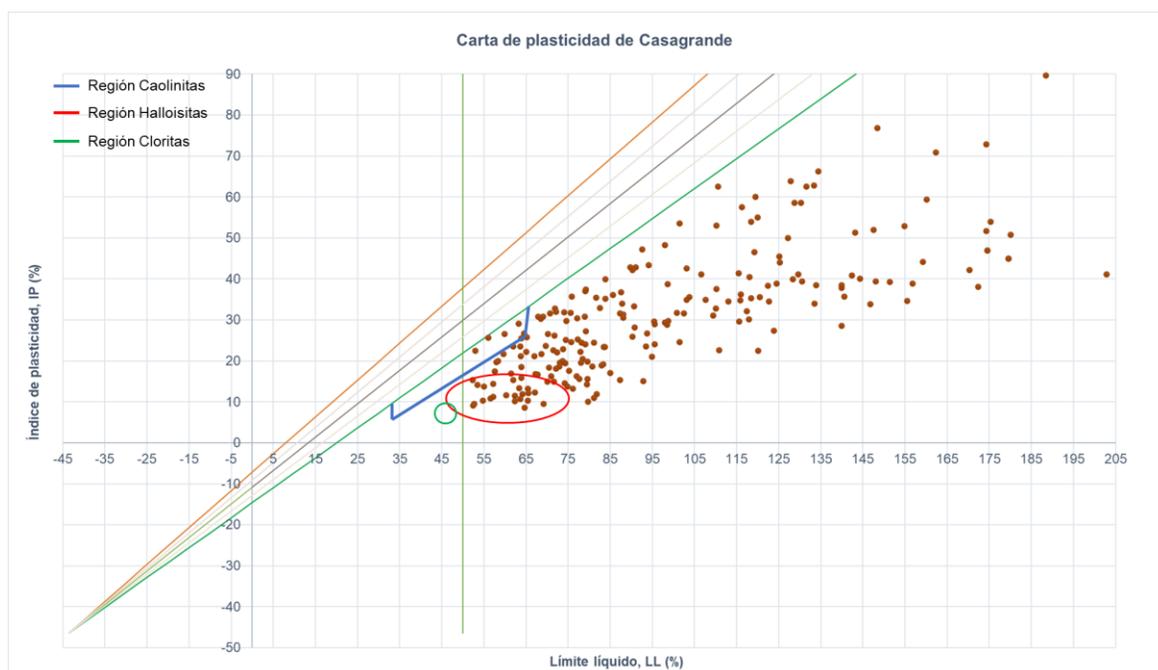
**Figura 47.** Gráfico de dispersión de las muestras clasificadas como limos de alta compresibilidad (MH) para Índice de Plasticidad (%) vs.  $Q_u$  (KN/m<sup>2</sup>).

La Figura 48 presenta datos de suelos clasificados como de baja y alta plasticidad, y consistencia media y firme, y se destacan los valores de regresión para ecuación lineal y logarítmica cuyas correlaciones siguen siendo muy bajas, incluso menores que en el análisis de la totalidad de las muestras.



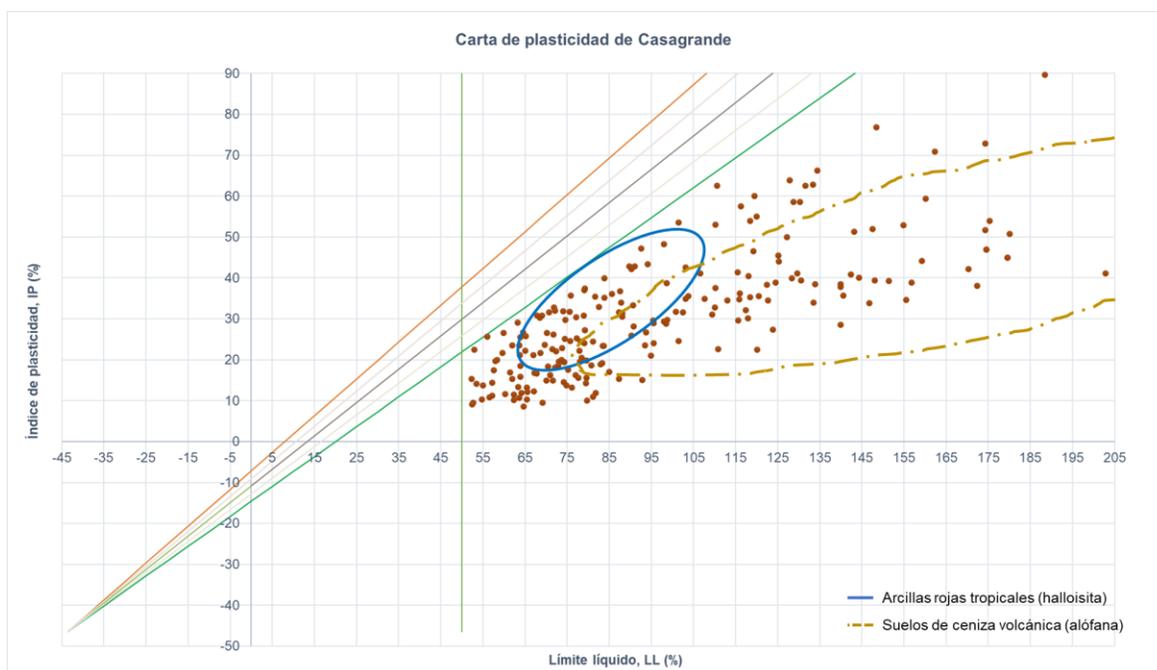
**Figura 48.** Gráfico de dispersión de las muestras clasificadas como limos de alta compresibilidad (MH) para Índice de Plasticidad (%) vs.  $Q_u$  (KN/m<sup>2</sup>), con plasticidad baja y alta, y consistencia media a firme.

De las 212 muestras clasificadas como limos de alta compresibilidad (MH), situadas en la carta de plasticidad de Casagrande modificada por Mitchell en 1976 (Figura 49), cerca de 25 puntos se localizan en el área de las halloisitas (12%), y 4 (2%) en el área de las caolinitas. No se ubican muestras en la región de las cloritas, es decir, la mayoría de las muestras no se encuentran dentro de la asociación a algún tipo de mineral de acuerdo con este autor.



**Figura 49.** Carta de plasticidad de Casagrande modificada por Mitchell (1976), en la cual se localizan las muestras clasificadas como limos de alta compresibilidad (MH).

Para la carta de plasticidad de Casagrande modificada por Wesley (1973, 2010), se presenta una mayor correlación que en el caso anterior, encontrando 70 muestras en la región asociada al mineral de halloisita (33%), y 87 en el área de suelos de ceniza volcánica asociados a alófana (41%), de las cuales 15 se encuentran también en la región compartida con minerales de halloisita, es decir, el 67% del total de puntos se clasificaron en las áreas definidas por este autor (Figura 50).



**Figura 50.** Carta de plasticidad de Casagrande modificada por Wesley (1973, 2010), en la cual se localizan las muestras clasificadas como limos de alta compresibilidad (MH).

### 5.3.2.2 Arenas limosas (SM)

Las 75 muestras clasificadas como arenas limosas (SM) de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), son denotadas como arenas (S), ya que más del 50% de sus partículas es inferior a 4,78 mm y superior a 0,075 mm, es decir, en el ensayo de granulometría quedaron retenidas entre el tamiz #4 y el tamiz #200. Por su parte, la denominación de limosas (M), viene dada por las características plásticas de la fracción fina contenida en estas arenas que, al ser ubicada en la carta de plasticidad de Casagrande, coincide con la región de limos.

En la Tabla 14 se presentan los resultados para las variables a comparar posteriormente, donde se tiene que:

- El Límite Líquido oscila entre 34 y 109%, con un promedio de 56%, el cual indica que la mayoría de las muestras presentan alta compresibilidad ( $LL > 50\%$ ).
- El Índice de Plasticidad varía entre 3,5 y 38% (con promedio de 12%), es decir, se tienen muestras que van desde baja hasta alta plasticidad.

- La compresión inconfinaada promedio es de 77 KN/m<sup>2</sup>, con amplio rango de variación, entre 7,1 y 184 KN/m<sup>2</sup>; valores relacionados a consistencias muy blandas a firmes.

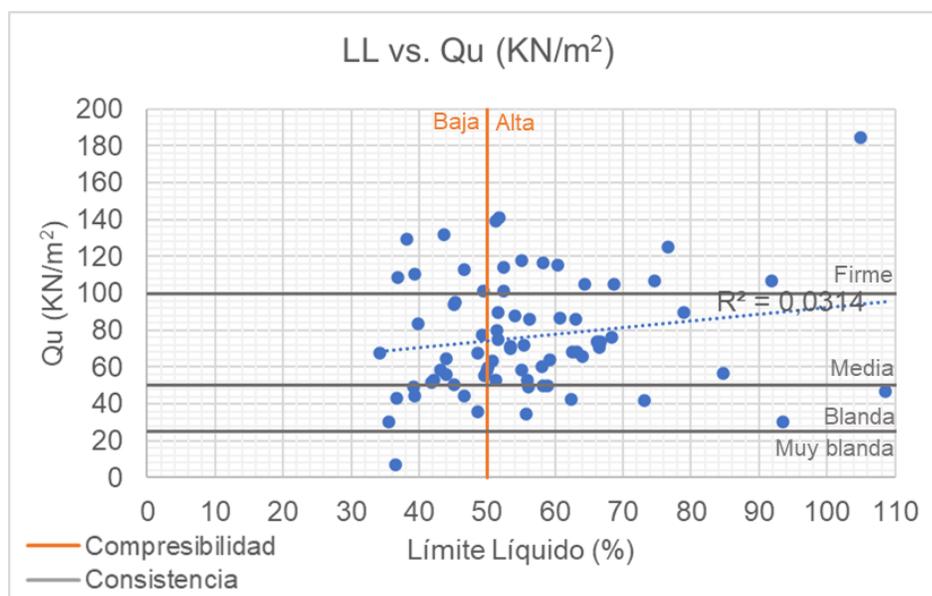
**Tabla 14.** Límites de Atterberg y resistencia a la compresión inconfinaada para muestras clasificadas como limos de alta compresibilidad (MH).

# Muestra	Prof. (m)	LL (%)	IP (%)	Qu (Ton/m <sup>2</sup> )	Qu (KN/m <sup>2</sup> )
18	4	56,0	8,5	5,0	49,13
22	8	55,7	4,2	3,5	34,46
25	4,5	36,6	6,8	0,7	7,06
36	11	49,3	9,9	7,9	77,60
37	4	53,4	8,1	7,3	71,55
38	13	64,0	17,9	6,7	65,85
54	4	58,2	10,9	11,9	116,33
55	8	36,9	4,2	11,1	108,44
59	4	59,2	8,8	6,5	64,02
61	4	45,1	4,9	9,6	93,95
65	4	66,5	9,3	7,5	73,30
69	7	84,7	9,4	5,8	56,44
72	4	44,1	5,3	5,7	55,78
76	3,5	51,4	7,6	8,2	80,13
77	2	46,6	7,9	4,5	44,40
78	1,5	43,1	4,3	5,9	58,15
80	1,5	48,6	8,1	3,6	35,62
81	5	51,6	9,4	7,6	74,70
88	5	39,4	3,5	11,3	110,70
89	4,5	46,6	5,4	11,5	112,80
91	4,5	51,5	10,6	9,2	89,83
92	1,6	55,0	4,9	6,0	58,66
95	4,7	60,4	5,2	11,8	115,33
123	5	52,5	7,5	10,3	101,01
124	7	74,7	20,9	10,9	106,89
131	6	55,4	13,7	7,3	71,59
132	15	105,0	38,1	18,8	184,37
136	7	76,6	18,0	12,7	124,88
139	8	50,8	5,1	6,4	63,07
140	5,5	34,2	4,4	6,9	67,32
148	4	39,2	7,0	5,0	49,43
154	1,5	91,8	10,4	10,9	106,60
156	1,5	52,4	9,4	11,6	114,05
158	1,5	43,6	6,5	13,5	131,90
159	3	56,3	14,3	8,8	86,10
168	1	45,1	7,2	5,2	50,50
171	1	62,6	14,7	7,0	68,45
179	5	51,7	9,6	14,4	141,12
180	7,5	55,0	11,0	12,0	117,68
191	2	43,9	8,5	6,6	64,45
192	5	45,2	8,5	9,7	95,38
194	11,5	58,0	16,3	6,2	60,33
197	3,1	51,2	13,4	14,2	139,06
198	7	49,4	14,4	10,3	101,42
200	2,3	48,6	9,7	6,9	67,31
202	4	62,3	10,2	4,4	42,78

# Muestra	Prof. (m)	LL (%)	IP (%)	Qu (Ton/m <sup>2</sup> )	Qu (KN/m <sup>2</sup> )
203	5,8	66,5	31,5	7,2	70,58
204	5	60,7	24,1	8,8	86,44
205	3,5	55,9	22,2	5,4	53,12
206	3	108,6	35,6	4,8	47,01
209	2	58,2	14,3	5,1	49,67
210	1,5	51,3	9,8	5,4	52,98
211	2,5	59,0	14,1	5,1	49,88
212	1,2	93,5	24,1	3,1	30,26
215	1,6	68,4	16,6	7,7	75,89
227	5	63,1	25,9	8,7	85,71
234	3	41,9	3,8	5,2	51,46
235	6	63,2	10,4	7,0	68,37
237	15	68,7	25,0	10,7	104,98
247	1,5	49,9	11,2	5,9	57,66
251	2	54,1	15,0	9,0	87,92
252	2	79,0	20,9	9,1	89,56
254	4,4	49,6	6,3	5,6	55,32
257	3	66,6	10,8	7,5	73,46
259	3	50,2	8,2	6,1	59,83
262	3	36,7	5,1	4,4	43,32
265	2,2	73,2	17,1	4,3	41,89
266	4	66,2	18,5	7,5	73,64
275	6	53,4	10,2	7,2	70,22
280	3,8	64,3	17,6	10,7	104,93
281	5	42,1	8,1	5,4	52,96
282	3	39,3	6,8	4,5	44,13
283	3,8	39,8	7,1	8,5	83,36
284	3,5	38,2	7,2	13,2	129,45
287	3	35,6	5,0	3,1	30,40
Promedio		56,1	11,8	7,8	76,5
Mínimo		34,2	3,5	0,7	7,1
Máximo		108,6	38,1	18,8	184,4

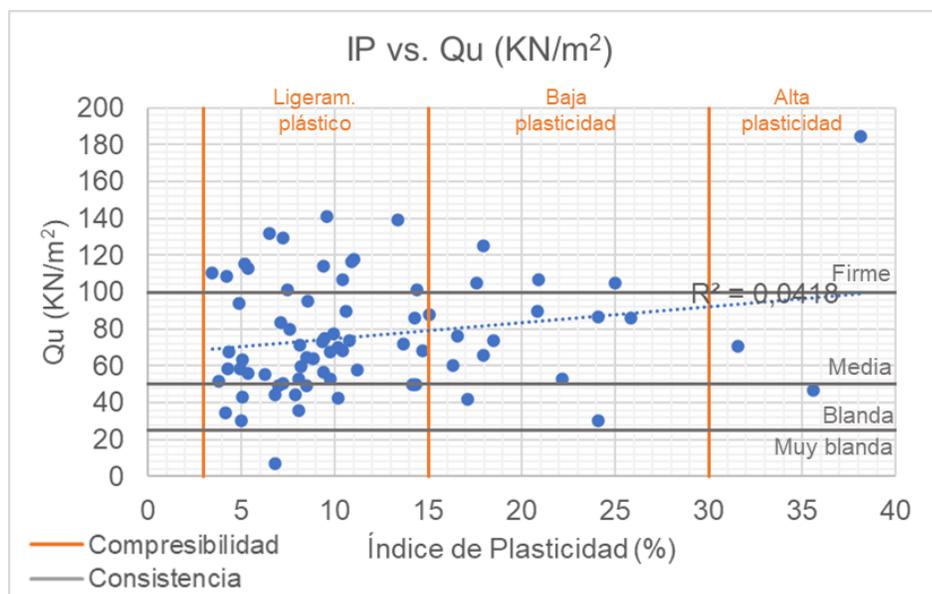
La Figura 51 presenta el gráfico de dispersión para las 75 muestras clasificadas como arenas limosas (SM), donde se ubica el Límite Líquido en las abscisas y la resistencia a la compresión inconfiada en las ordenadas. Aquí se observa que el 64% de las muestras tienen Límite Líquido superior a 50%, es decir, 48 muestras tienen alta compresibilidad, y los 27 restantes tienen baja compresibilidad. De acuerdo con los resultados de resistencia a la compresión inconfiada, el 55% de los puntos se encuentra en el área de resistencia media (41 muestras), el 25% en la región de resistencia firme (19 muestras) y el 19% en el intervalo de consistencia blanda (19%). Además, la dispersión no sigue un patrón de linealidad, y su correlación es muy baja (0,0314).

Al extraer las muestras concentradas en una descripción de consistencia media, se obtuvo una regresión inferior (0,027), por lo tanto, el gráfico no se presenta en este documento.



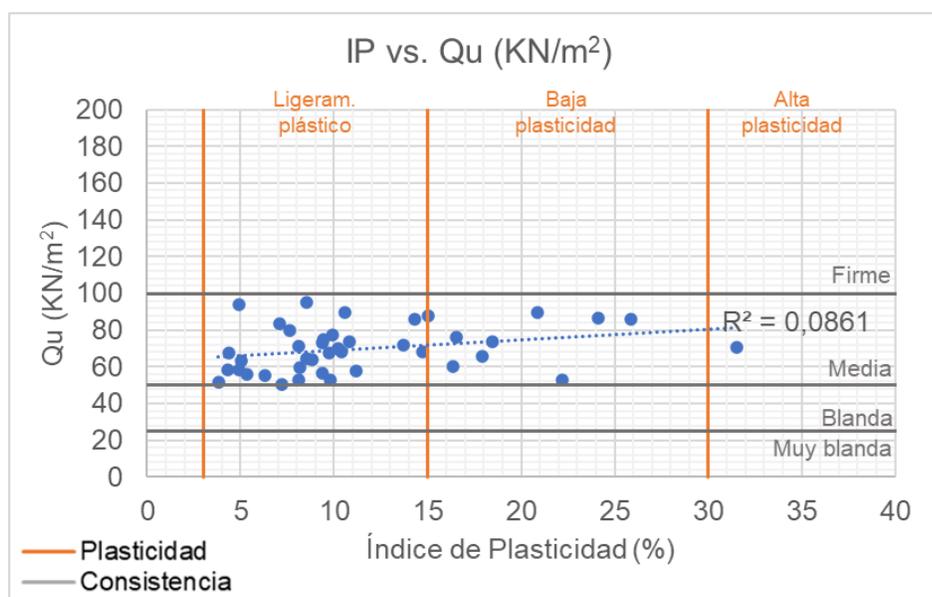
**Figura 51.** Gráfico de dispersión de las muestras clasificadas como arenas limosas (SM) para Límite Líquido (%) vs. Qu (KN/m<sup>2</sup>).

Para las variables de Índice de Plasticidad (%) y resistencia a la compresión inconfiada (KN/m<sup>2</sup>), se graficaron los puntos en la Figura 52, donde se aprecia un predominio de suelos ligeramente plásticos (57 muestras de 75, es decir, 76%). Al asociar las dos variables en cuestión, se tiene una regresión muy baja para un tipo de correlación lineal (0,0418).



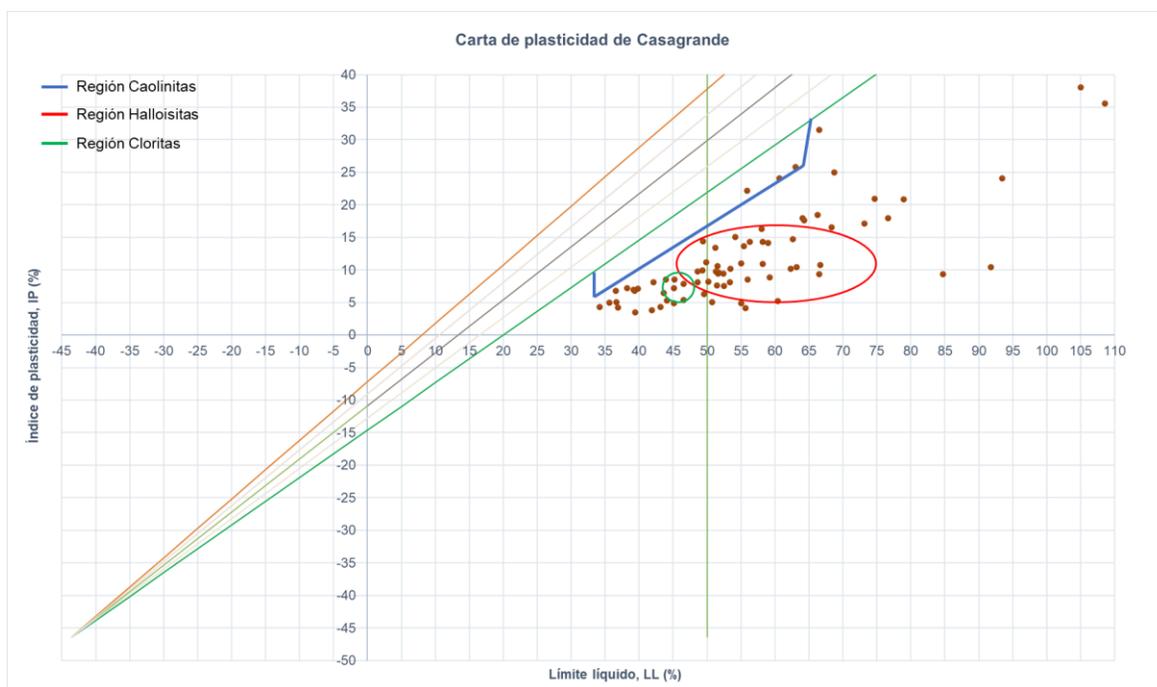
**Figura 52.** Gráfico de dispersión de las muestras clasificadas como arenas limosas (SM) para Índice de Plasticidad (%) vs. Qu (KN/m<sup>2</sup>).

Limitando el análisis exclusivamente a las muestras asociadas a una consistencia media (dado que aquí se concentra la mayoría de los puntos), se evidencia un leve aumento en la regresión lineal, que pasa a ser 0,0861 (Figura 53), sin embargo, continúa siendo un valor muy bajo para definir un patrón de comportamiento de las variables evaluadas.

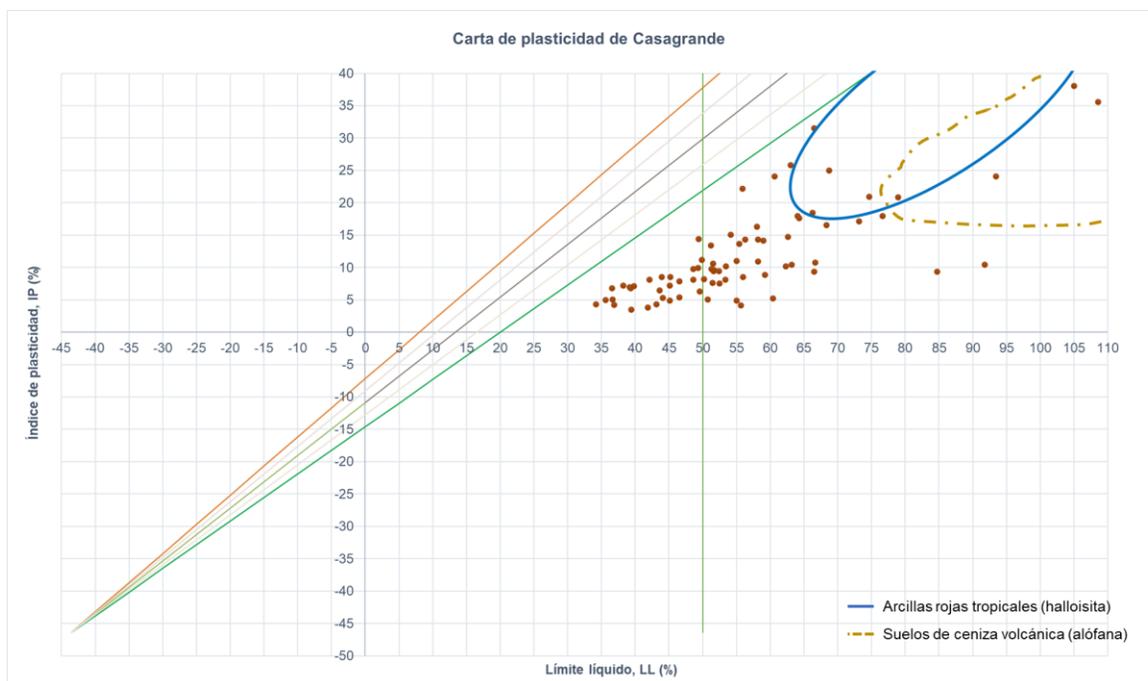


**Figura 53.** Gráfico de dispersión de las muestras clasificadas como arenas limosas (SM) para Índice de Plasticidad (%) vs. Qu (KN/m<sup>2</sup>), cuya consistencia se caracteriza como media.

Con miras a revisar los posibles minerales contenidos en las muestras, se ubicaron los 75 puntos en la carta de plasticidad de Casagrande modificada por Mitchell en 1976 (Figura 54) y en la carta de plasticidad modificada por Wesley en 1973 y 2010 (Figura 55). Para la primera carta se identificaron 31 puntos en el área de las halloisitas (41%), 3 en el área de las caolinitas (4%), y 6 en la región de las cloritas (8%), mientras que en la segunda carta, solo siete puntos del total se ubicaron en las regiones señaladas por el autor.



**Figura 54.** Carta de plasticidad de Casagrande modificada por Mitchell (1976), en la cual se localizan las muestras clasificadas como arenas limosas (SM).



**Figura 55.** Carta de plasticidad de Casagrande modificada por Wesley (1973, 2010), en la cual se localizan las muestras clasificadas como arenas limosas (SM).

### 5.3.3 Criterio: número de golpes en ensayo SPT

Dado que 262 de los 293 puntos muestreados cuentan con prueba de penetración estándar en campo (SPT), y al igual que en el ensayo de resistencia a la compresión inconfiada, estos resultados pueden correlacionarse con la consistencia del suelo, se realizó una zonificación de los datos con respecto a este criterio, considerando el número de golpes reportados en el ensayo de campo (que oscilan entre 8 y 80).

Es así como se revisaron los rangos de 8 a 15 golpes, 15 a 30 golpes, y más de 30 golpes, que para suelos arcillosos están asociados respectivamente a consistencia firme, muy firme y dura, y en los cuales se tienen 15, 132 y 115 muestras.

Considerando que solo se tienen 15 muestras en el rango de 8 a 15 golpes, este se descartó para efecto de análisis, y a continuación se presenta la revisión de correlación de variables en los rangos de 15 a 30 golpes y más de 30 golpes.

### 5.3.3.1 Muestras con N de campo entre 15 y 30 golpes

Como se mencionó anteriormente, en este rango de golpes se tienen 132 muestras, es decir, el 50% de los puntos a los que se realizó ensayo de SPT en campo, cuyos resultados de Límite Líquido, Índice de Plasticidad y resistencia a la compresión inconfiada, se resumen en la Tabla 15.

Aquí se puede observar que la mayoría de las muestras tienen un Límite Líquido superior a 50%, asociado a compresibilidad alta (promedio de 80%), su Índice de Plasticidad promedio es de 21%, lo cual se correlaciona con un predominio de muestras con baja plasticidad, y su resistencia a la compresión inconfiada oscila entre 7 y 271  $\text{KN/m}^2$ , por lo tanto, se presumen consistencias variables entre muy blandas y muy firmes.

**Tabla 15.** Límites de Atterberg y resistencia a la compresión inconfiada para muestras cuyo N de campo oscila entre 15 y 30 golpes.

# Muestra	Prof. (m)	LL (%)	IP (%)	Qu (Ton/m <sup>2</sup> )	Qu (KN/m <sup>2</sup> )
1	5	82,5	32,9	16,3	160,2
2	1,5	56,6	10,8	8,1	79,2
3	4	90,6	33,3	19,2	188,6
4	7,5	107,6	34,9	14,9	146,1
5	4,5	118,0	30,2	12,7	124,6
7	8	98,8	29,7	7,9	77,2
8	1,5	64,6	26,7	6,0	59,2
9	3,5	79,7	10,1	16,5	162,1
13	5	160,2	59,4	8,6	84,2
19	4,8	110,1	32,8	4,9	48,0
20	1,5	122,7	34,5	9,4	92,4
23	2	79,6	15,6	7,3	72,0
25	4,5	36,6	6,8	0,7	7,1
29	9	101,5	24,5	2,1	20,9
30	13	73,0	19,6	4,5	44,0
31	8	74,8	13,7	8,3	81,3
32	1,5	63,6	10,7	6,5	63,8
33	1,5	65,4	10,4	7,6	74,8
35	1,5	67,1	12,2	6,5	63,9
38	13	64,0	17,9	6,7	65,9
40	12	87,8	34,0	7,7	75,7
42	2	110,9	22,6	8,9	87,3
43	2,5	81,8	11,9	6,0	58,5
44	1,5	77,1	16,2	9,1	89,2
45	4,5	60,2	11,6	7,8	76,9
46	3,5	79,5	14,3	6,7	65,3
47	7	75,3	17,6	6,7	65,2
48	6,5	76,1	13,3	6,8	66,2
50	7,5	70,5	18,4	9,2	89,8
51	3	71,0	16,2	8,0	78,8

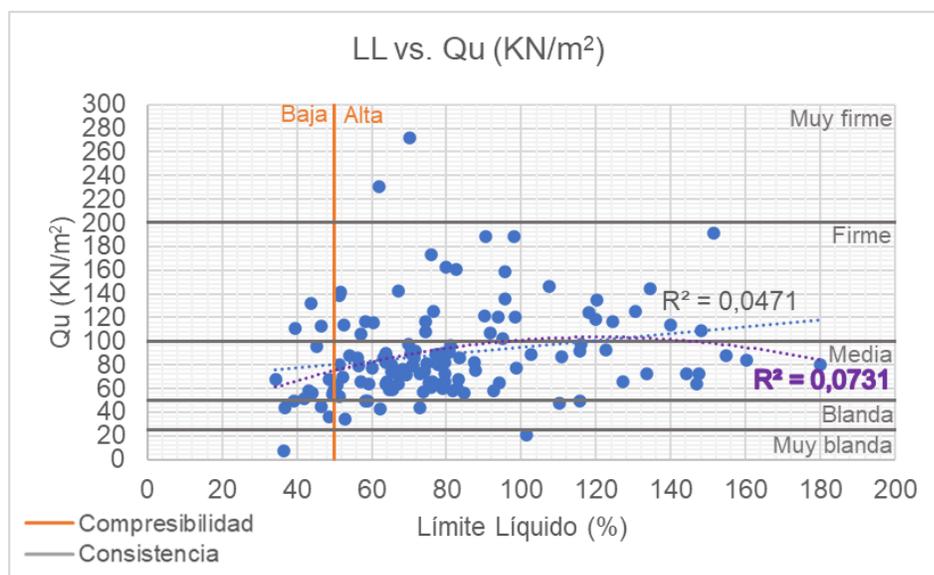
# Muestra	Prof. (m)	LL (%)	IP (%)	Qu (Ton/m <sup>2</sup> )	Qu (KN/m <sup>2</sup> )
52	5	83,3	19,2	6,9	67,6
54	4	58,2	10,9	11,9	116,3
56	4,5	87,3	15,4	8,4	82,1
57	8	147,5	52,0	7,4	72,2
58	8	140,0	37,9	11,6	113,5
59	4	59,2	8,8	6,5	64,0
60	8	130,5	39,4	12,7	124,8
62	5	52,7	9,5	3,5	34,4
63	9	83,4	23,4	8,8	86,1
65	4	66,5	9,3	7,5	73,3
66	12	94,9	21,0	10,4	101,9
69	7	84,7	9,4	5,8	56,4
72	4	44,1	5,3	5,7	55,8
76	3,5	51,4	7,6	8,2	80,1
77	2	46,6	7,9	4,5	44,4
78	1,5	43,1	4,3	5,9	58,2
80	1,5	48,6	8,1	3,6	35,6
84	3	65,4	13,2	8,1	79,8
85	4	120,0	55,0	12,1	118,5
87	4	180,1	50,8	8,2	80,5
88	5	39,4	3,5	11,3	110,7
89	4,5	46,6	5,4	11,5	112,8
93	1,5	83,0	19,0	6,1	60,1
94	1,5	77,7	15,6	8,2	80,3
95	4,7	60,4	5,2	11,8	115,3
96	10,5	69,2	9,5	7,3	71,6
98	7	71,5	22,6	8,7	85,7
99	11	124,5	38,9	11,9	116,4
107	6	74,5	25,1	11,9	116,2
108	6	70,2	26,6	27,7	271,7
110	9	98,5	28,8	12,3	120,1
113	6	120,1	22,5	13,8	134,9
116	9	93,8	26,7	12,2	119,9
118	9	95,5	28,9	16,2	159,1
119	12	98,0	29,4	19,2	188,6
120	4	62,0	15,3	23,5	230,6
125	9	80,7	18,6	9,2	90,2
126	13	144,3	40,1	7,4	72,6
127	10	81,2	24,5	9,8	96,1
128	12	90,3	25,9	12,4	121,6
129	14	146,8	33,8	6,5	63,7
136	7	76,6	18,0	12,7	124,9
138	1,5	65,5	12,2	6,1	59,5
139	8	50,8	5,1	6,4	63,1
140	5,5	34,2	4,4	6,9	67,3
143	12,5	133,5	34,0	7,4	72,7
144	7	115,6	29,6	9,4	92,0
145	6	67,2	16,8	14,5	142,0
147	1,5	57,2	11,2	10,9	106,4
148	4	39,2	7,0	5,0	49,4
154	1,5	91,8	10,4	10,9	106,6
155	5	79,6	19,8	8,4	82,5
156	1,5	52,4	9,4	11,6	114,1
157	4	74,3	19,4	11,0	107,6
158	1,5	43,6	6,5	13,5	131,9

# Muestra	Prof. (m)	LL (%)	IP (%)	Qu (Ton/m <sup>2</sup> )	Qu (KN/m <sup>2</sup> )
159	3	56,3	14,3	8,8	86,1
161	11	151,4	39,2	19,5	191,4
163	11	148,0	39,4	11,1	108,7
170	4	74,0	19,5	7,6	74,7
172	3	63,9	18,5	8,4	82,0
173	6	116,0	36,2	9,9	97,1
174	1,5	102,5	31,6	9,1	88,9
175	5	71,7	26,2	9,3	91,2
176	3	77,3	25,3	8,4	82,3
178	10	95,5	24,1	13,9	136,2
179	5	51,7	9,6	14,4	141,1
188	6	94,1	43,4	6,6	65,1
189	2	73,8	22,9	5,8	57,3
192	5	45,2	8,5	9,7	95,4
195	6	75,8	24,5	6,3	61,4
197	3,1	51,2	13,4	14,2	139,1
200	2,3	48,6	9,7	6,9	67,3
202	4	62,3	10,2	4,4	42,8
208	2	154,8	52,9	8,9	87,4
209	2	58,2	14,3	5,1	49,7
210	1,5	51,3	9,8	5,4	53,0
211	2,5	59,0	14,1	5,1	49,9
213	2	57,2	14,3	6,7	66,2
215	1,6	68,4	16,6	7,7	75,9
216	4	72,9	18,6	7,4	72,5
218	3	63,6	23,6	9,0	88,3
219	9	75,9	35,7	17,7	173,1
222	3	52,3	15,4	7,1	69,5
223	6	92,6	47,2	6,0	58,4
226	2,5	77,2	30,4	6,5	63,5
227	5	63,1	25,9	8,7	85,7
229	3	70,7	31,7	8,1	79,4
231	9	134,4	66,2	14,7	144,4
234	3	41,9	3,8	5,2	51,5
247	1,5	49,9	11,2	5,9	57,7
248	5,5	63,9	15,8	9,2	89,8
249	1,5	69,7	23,7	9,9	97,5
251	2	54,1	15,0	9,0	87,9
252	2	79,0	20,9	9,1	89,6
253	2	127,2	50,0	6,7	65,5
254	4,4	49,6	6,3	5,6	55,3
257	3	66,6	10,8	7,5	73,5
259	3	50,2	8,2	6,1	59,8
260	6	79,0	30,9	6,1	60,0
262	3	36,7	5,1	4,4	43,3
264	6	115,5	41,4	5,0	49,5
266	4	66,2	18,5	7,5	73,6
Promedio		80,04	21,33	9,08	89,03
Mínimo		34,22	3,46	0,72	7,06
Máximo		180,08	66,24	27,71	271,74

En la Figura 56 se grafican los puntos correspondientes a N de campo entre 8 y 15 golpes, donde en el eje de las abscisas se ubica el valor de Límite Líquido (%) y en las ordenadas la

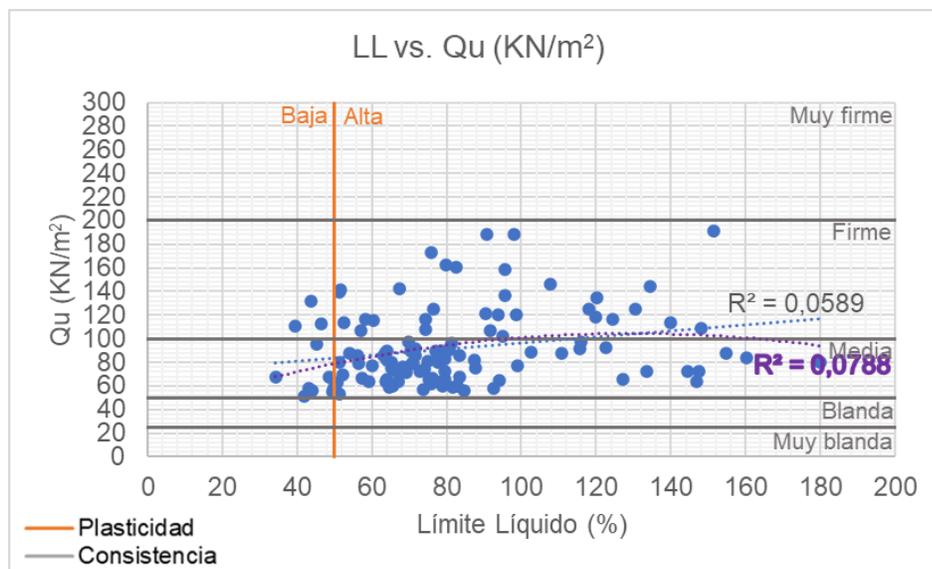
resistencia a la compresión inconfiada ( $\text{KN/m}^2$ ). El 88% de estas muestras presenta compresibilidad alta, asociada a un Límite Líquido superior a 50%, y para el caso de la consistencia en función de la resistencia a la compresión inconfiada, esta se describe como media para el 62% de las muestras (entre 50 y 100  $\text{KN/m}^2$ ) y firme para el 27% (entre 100 y 200  $\text{KN/m}^2$ ).

Al analizar la dispersión de los puntos, se observa que no se ajusta a una correlación de tipo lineal, ya que su regresión es (0,0471), y aunque este valor es más alto si se revisa para una ecuación polinómica de grado dos (0,0731), aún se mantiene muy bajo para acercarse a algún comportamiento puntual.



**Figura 56.** Gráfico de dispersión de las muestras con N campo entre 8 y 15 golpes, para Límite Líquido (%) vs.  $Q_u$  ( $\text{KN/m}^2$ ).

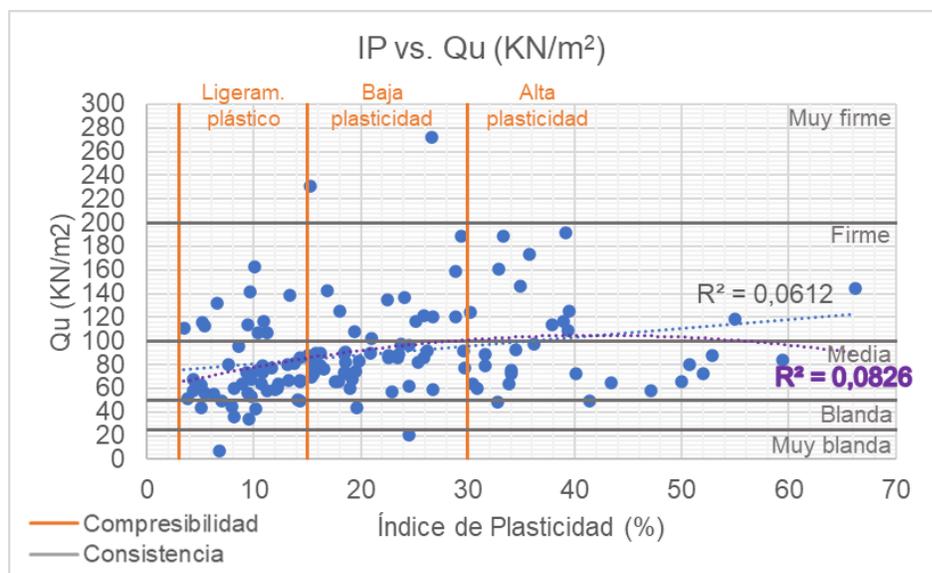
Para el gráfico de dispersión que se presenta en la Figura 57, se extraen los puntos localizados en la región de consistencia media y firme (de acuerdo con su resistencia a la compresión inconfiada), y se evidencia que la regresión lineal aumenta a 0,0589, manteniéndose muy baja, y para la ecuación polinómica de grado dos, no se observan mayores cambios en su regresión.



**Figura 57.** Gráfico de dispersión de las muestras con N campo entre 8 y 15 golpes, y consistencia media a firme, para Límite Líquido (%) vs. Qu (KN/m<sup>2</sup>).

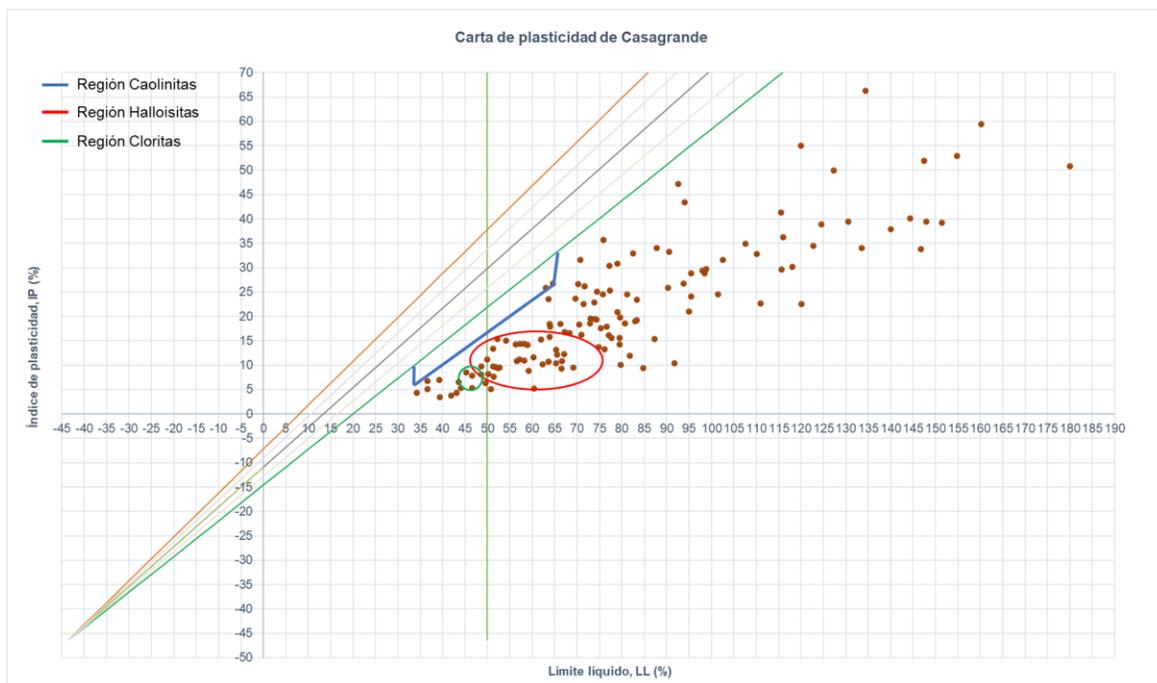
La Figura 58 presenta el gráfico de dispersión para el Índice de Plasticidad (%) vs. la resistencia a la compresión confinada (KN/m<sup>2</sup>) de las 132 muestras con un rango de golpes entre 8 y 15. Aquí se observa una distribución repartida entre ligera, baja y alta plasticidad, donde cada rango tiene 50, 51 y 31 muestras respectivamente, es decir, 38, 39 y 23% del total. Además, la dispersión no sigue un patrón de linealidad, ya que su correlación es muy baja (0,0612), y para una ecuación polinómica de grado dos, aumenta muy poco (0,0826).

Al extraer las muestras concentradas en una descripción de consistencia media a firme, se obtuvo una regresión muy cercana a los valores anteriormente expuestos, por lo tanto, el gráfico no se presenta en este documento.



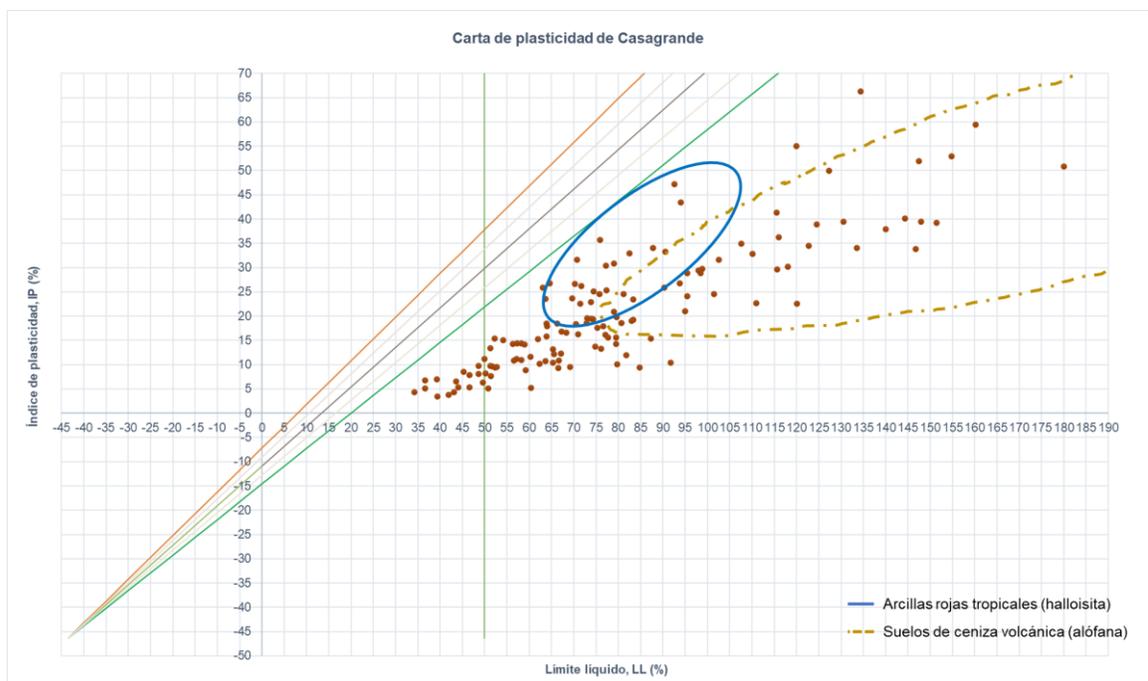
**Figura 58.** Gráfico de dispersión de las muestras con N campo entre 8 y 15 golpes, para Índice de Plasticidad (%) vs. Qu (KN/m<sup>2</sup>).

Al ubicar las 132 muestras en la carta de plasticidad de Casagrande modificada por Mitchell en 1976 (Figura 59), se identifican 33 puntos en el área de las haollisitas (25%), 2 en el área de las caolinitas (2%), y 3 en la región de las cloritas (2%). Con estos porcentajes se evidencia que la mayoría de las muestras evaluadas en el rango de 8 a 15 golpes, no se clasifica dentro de las áreas de minerales típicos diferenciadas por el autor.



**Figura 59.** Carta de plasticidad de Casagrande modificada por Mitchell (1976), en la cual se localizan las muestras con N de campo entre 8 y 15 golpes.

Para la carta de plasticidad de Casagrande modificada por Wesley (1973, 2010), se presenta una mayor correlación que en el caso anterior, encontrando 30 muestras en la región asociada al mineral de halloisita (23%), y 39 en el área de suelos de ceniza volcánica asociados a alófana (30%), de las cuales 4 se encuentran también en la región compartida con minerales de halloisita, es decir, el 49% del total de puntos se clasificaron en las áreas definidas por este autor (Figura 60).



**Figura 60.** Carta de plasticidad de Casagrande modificada por Wesley (1973, 2010), en la cual se localizan las muestras con N de campo entre 8 y 15 golpes.

### 5.3.3.2 Muestras con N de campo superior a 30 golpes

Para el análisis de los puntos con N de campo superior a 30 golpes, se tienen 115 muestras, es decir, el 44% del total de muestras con ensayo de penetración estándar en campo. Sus resultados se consignan en la Tabla 16, donde se muestran los valores promedio, mínimos y máximos para cada variable, y se evidencia que:

- El Límite Líquido oscila entre 36 y 203%, con un promedio de 99%, indicando que la mayoría de muestras presentan alta compresibilidad ( $LL > 50\%$ ).
- El Índice de Plasticidad promedio es de 32%, asociado a alta plasticidad. Las muestras varían en un amplio rango entre 4 y 77%.
- La resistencia a la compresión inconfiada tiene valores entre 21 y 374  $\text{KN/m}^2$ , correspondientes a consistencias muy blandas a muy firmes. Su promedio es de 118  $\text{KN/m}^2$ .

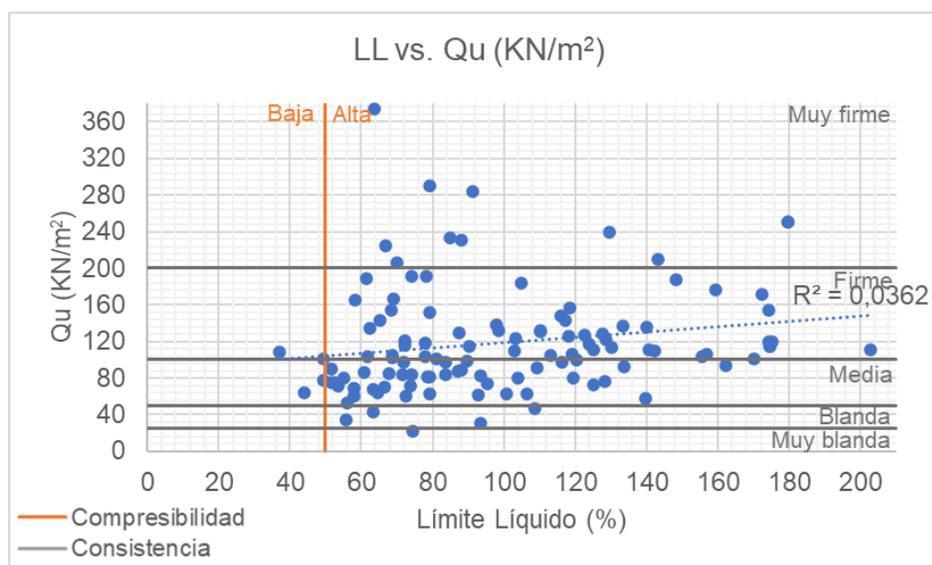
**Tabla 16.** Límites de Atterberg y resistencia a la compresión inconfiada para muestras cuyo N de campo oscila entre 15 y 30 golpes.

# Muestra	Prof. (m)	LL (%)	IP (%)	Qu (Ton/m <sup>2</sup> )	Qu (KN/m <sup>2</sup> )
6	8	115,9	34,8	15,0	147,5
10	5	91,1	42,9	28,9	283,6
11	5	143,2	51,3	21,4	210,0
12	14	119,2	46,6	10,9	106,6
14	9	87,6	36,7	13,2	129,6
15	14	125,3	44,0	7,4	72,8
16	9	87,3	31,6	9,0	88,1
17	14	100,9	31,7	6,4	62,6
21	7	68,7	21,7	10,4	102,1
22	8	55,7	4,2	3,5	34,5
24	7	202,9	41,1	11,4	111,5
26	4	78,1	24,4	19,5	190,7
27	3	61,9	23,6	10,6	103,9
28	7	72,2	18,1	11,9	116,5
34	4,5	64,7	8,6	6,6	64,4
36	11	49,3	9,9	7,9	77,6
37	4	53,4	8,1	7,3	71,5
39	16	106,6	41,2	6,4	62,9
41	14	72,4	22,0	6,2	60,6
49	3	70,0	14,9	21,1	206,6
53	4,5	81,1	10,9	10,4	101,5
55	8	36,9	4,2	11,1	108,4
67	16	71,6	14,9	8,6	84,4
68	20	120,5	35,6	10,2	99,6
70	10,5	79,1	24,0	8,4	81,9
71	14	83,7	23,4	10,0	98,0
73	8	79,1	27,2	15,5	151,8
74	12	88,1	31,4	9,1	88,8
75	20	133,9	38,5	9,5	93,1
79	4	78,5	20,5	8,3	81,6
81	5	51,6	9,4	7,6	74,7
82	4	52,4	9,2	7,7	75,3
83	1,5	62,3	10,2	13,7	134,1
86	7	174,4	51,7	15,7	154,1
91	4,5	51,5	10,6	9,2	89,8
97	12	170,3	42,2	10,3	100,8
100	13	172,4	38,1	17,4	171,0
101	6	129,7	41,1	24,5	240,0
102	8	179,6	44,9	25,6	250,9
103	10	174,5	47,0	11,7	115,1
104	12,2	74,0	31,8	19,5	191,0
105	5	61,4	16,9	19,3	189,1
106	5	123,8	27,4	12,0	117,2
109	7	77,9	22,2	12,1	118,7
111	15	88,1	30,5	23,5	230,8
112	18	110,2	37,5	13,5	131,9
114	15	117,4	32,1	14,6	143,6
115	18	118,4	35,3	16,0	156,7
117	15	140,6	35,7	11,3	111,1
121	10	98,7	38,8	13,5	132,4
122	13	113,1	34,5	10,7	105,3
130	15	159,3	44,1	18,0	176,5

# Muestra	Prof. (m)	LL (%)	IP (%)	Qu (Ton/m <sup>2</sup> )	Qu (KN/m <sup>2</sup> )
132	15	105,0	38,1	18,8	184,4
133	13	156,8	38,9	10,8	105,9
134	16	63,8	21,2	38,1	373,6
135	7	85,0	17,0	23,8	233,4
137	7	58,3	19,9	16,9	165,7
142	7,5	93,5	23,5	8,5	83,0
146	10	103,2	42,6	12,6	123,8
149	7	74,2	14,6	8,5	83,3
150	10	63,4	13,3	4,4	42,9
151	10	103,1	34,9	11,2	109,6
152	10	128,4	39,9	7,8	76,1
153	10	118,1	40,5	12,9	126,2
160	14	65,2	25,8	14,6	142,8
162	14	139,9	38,5	5,9	57,9
164	12	140,0	28,5	13,8	135,3
165	15,5	155,5	34,7	10,6	104,0
166	8	179,6	44,9	25,6	250,9
167	10	174,5	47,0	11,7	115,1
177	8	122,5	38,4	12,9	126,7
185	5	74,6	29,8	2,2	21,5
186	4	55,0	13,8	8,2	80,2
187	1,5	67,7	16,7	8,7	85,4
190	5	68,5	30,3	15,7	154,3
191	2	43,9	8,5	6,6	64,5
193	8	95,5	29,6	7,5	73,8
194	11,5	58,0	16,3	6,2	60,3
196	9	125,2	45,5	11,4	111,5
198	7	49,4	14,4	10,3	101,4
199	9,7	90,2	42,2	11,7	115,1
201	8,2	57,9	19,7	7,0	69,0
203	5,8	66,5	31,5	7,2	70,6
204	5	60,7	24,1	8,8	86,4
205	3,5	55,9	22,2	5,4	53,1
206	3	108,6	35,6	4,8	47,0
207	5,1	69,1	30,8	16,9	166,0
212	1,2	93,5	24,1	3,1	30,3
214	3	119,5	60,0	8,1	79,5
217	4,5	103,8	35,6	8,1	79,9
220	12	71,9	32,7	10,0	98,0
221	15	98,0	48,3	14,1	138,2
224	12	142,4	40,9	11,2	109,5
225	15	79,1	37,0	29,5	289,5
228	10	133,4	62,8	13,9	136,6
232	12	110,2	53,1	13,3	130,2
233	15	116,2	57,5	9,9	97,3
235	6	63,2	10,4	7,0	68,4
236	12	89,8	42,8	10,1	98,8
237	15	68,7	25,0	10,7	105,0
238	3	128,8	58,6	12,5	122,7
239	9	130,3	58,5	11,6	113,9
240	13	79,1	37,4	6,4	62,8
241	6	162,3	70,9	9,6	93,7
242	9	174,3	72,9	12,2	120,1
243	15	72,2	31,9	12,4	121,4
244	7	148,4	76,8	19,1	187,6

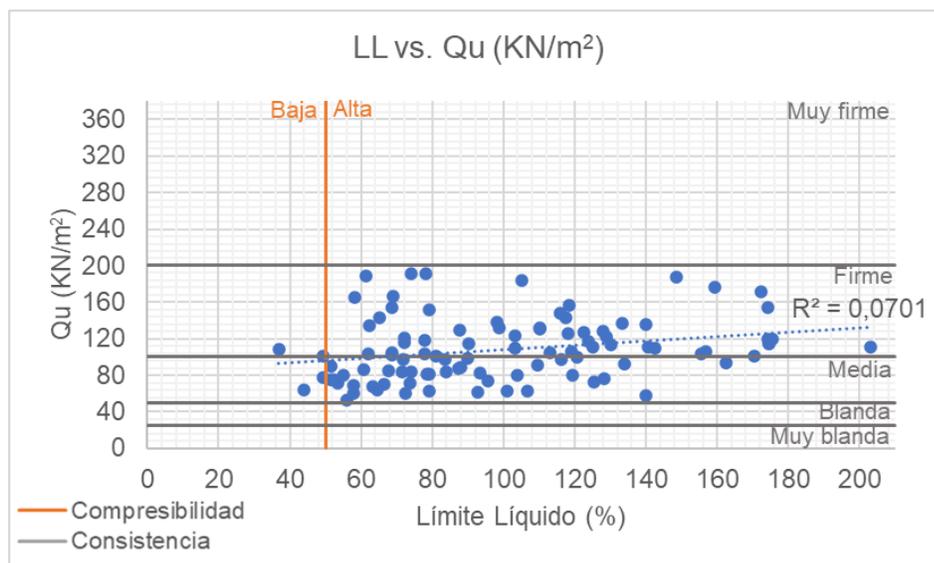
# Muestra	Prof. (m)	LL (%)	IP (%)	Qu (Ton/m <sup>2</sup> )	Qu (KN/m <sup>2</sup> )
245	6	73,7	20,0	7,3	71,7
246	9	127,8	63,8	13,1	128,1
250	4,5	67,0	21,2	22,9	225,0
255	6	175,4	54,0	12,2	119,5
256	9	83,8	35,2	8,5	83,3
258	9,5	92,8	15,1	6,3	61,4
261	12	109,4	31,0	9,2	90,6
263	9	78,0	19,5	10,6	104,2
Promedio		99,57	32,08	12,12	118,87
Mínimo		36,89	4,15	2,19	21,48
Máximo		202,92	76,81	38,10	373,64

En la Figura 61 se presenta el gráfico de dispersión para las 115 muestras con N de campo superior a 30 golpes (Límite Líquido en el eje de las abscisas y resistencia a la compresión inconfínada en las ordenadas). Aquí se evidencia que el 97% de las muestras evaluadas exhiben un Límite Líquido superior a 50%, es decir, tienen alta compresibilidad (111 muestras), y de acuerdo con los resultados de resistencia a la compresión inconfínada, el 86% oscila entre consistencia media y firme. Para este caso, 99 muestras se concentran en las zonas con mayor cantidad de puntos (86%) mencionadas anteriormente: Límite Líquido superior a 50% y resistencia a la compresión inconfínada entre 50 y 200 KN/m<sup>2</sup>. Se observa que la dispersión no sigue un patrón de linealidad, y su correlación es muy baja (0,0362).



**Figura 61.** Gráfico de dispersión de las muestras con N de campo superior a 30 golpes, para Límite Líquido (%) vs. Qu (KN/m<sup>2</sup>).

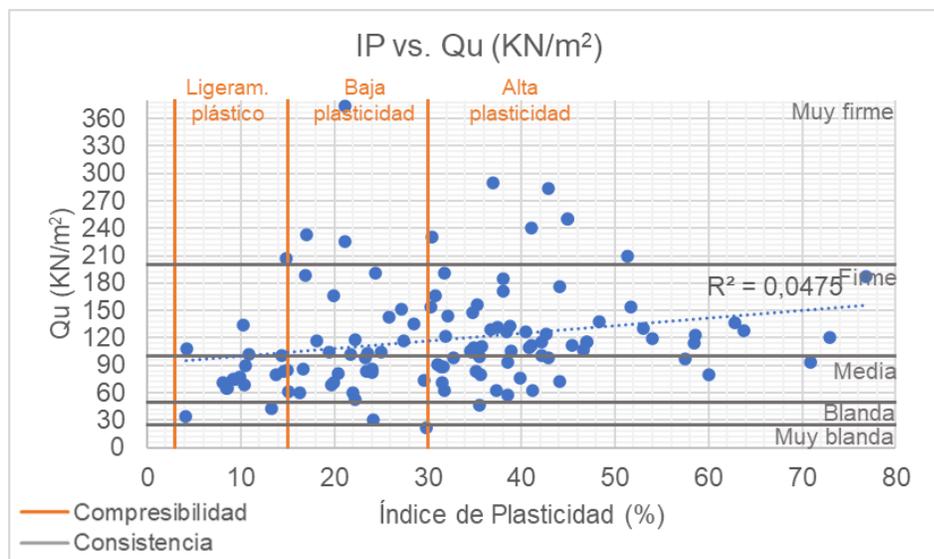
Para un mayor detalle de esta zona con alta concentración de puntos, se elaboró la gráfica contenida en la Figura 62, donde la distribución de los mismos aumenta su linealidad con respecto al análisis de la totalidad de las muestras con N de campo superior a 30 golpes, pasando de tener una regresión de 0,0362, a ser de 0,0701; valor que se mantiene muy bajo.



**Figura 62.** Gráfico de dispersión para el área donde se concentra la mayoría de las muestras con N de campo superior a 30 golpes, compresibilidad alta (LL>50%) vs. consistencia media y firme (RCI entre 50 y 200 KN/m<sup>2</sup>).

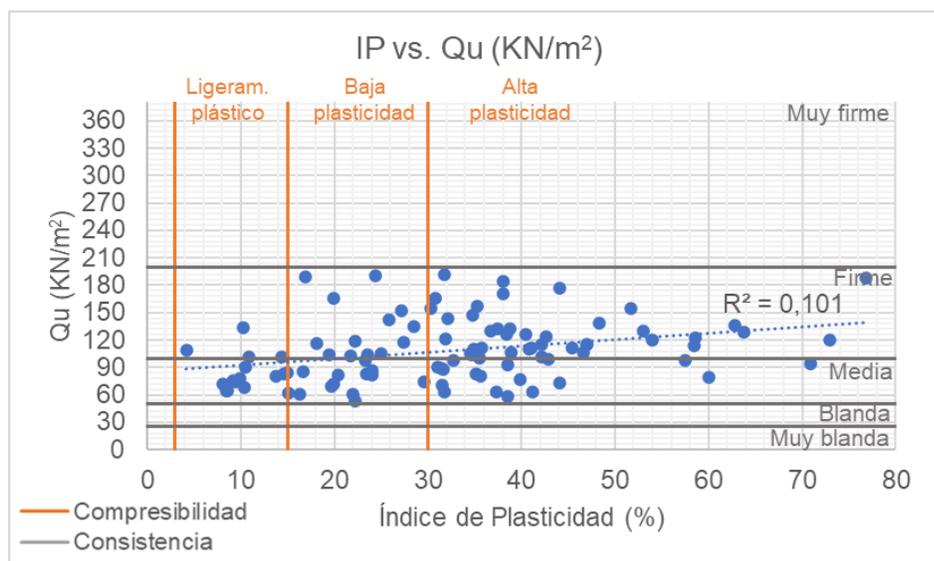
Para las variables de Índice de Plasticidad (%) vs. resistencia a la compresión inconfínada (KN/m<sup>2</sup>), se elaboró la gráfica mostrada en la Figura 63, donde se evidencia una concentración marcada de puntos hacia la zona de alta plasticidad (66 muestras, es decir, 57% del total), y se tienen 31 muestras con baja plasticidad (27%) y 18 ligeramente plásticas (16%).

Al revisar la regresión lineal para la correlación de las dos variables – Índice de Plasticidad (%) y resistencia a la compresión inconfínada (KN/m<sup>2</sup>) –, se encuentra un valor muy bajo (0,0475).



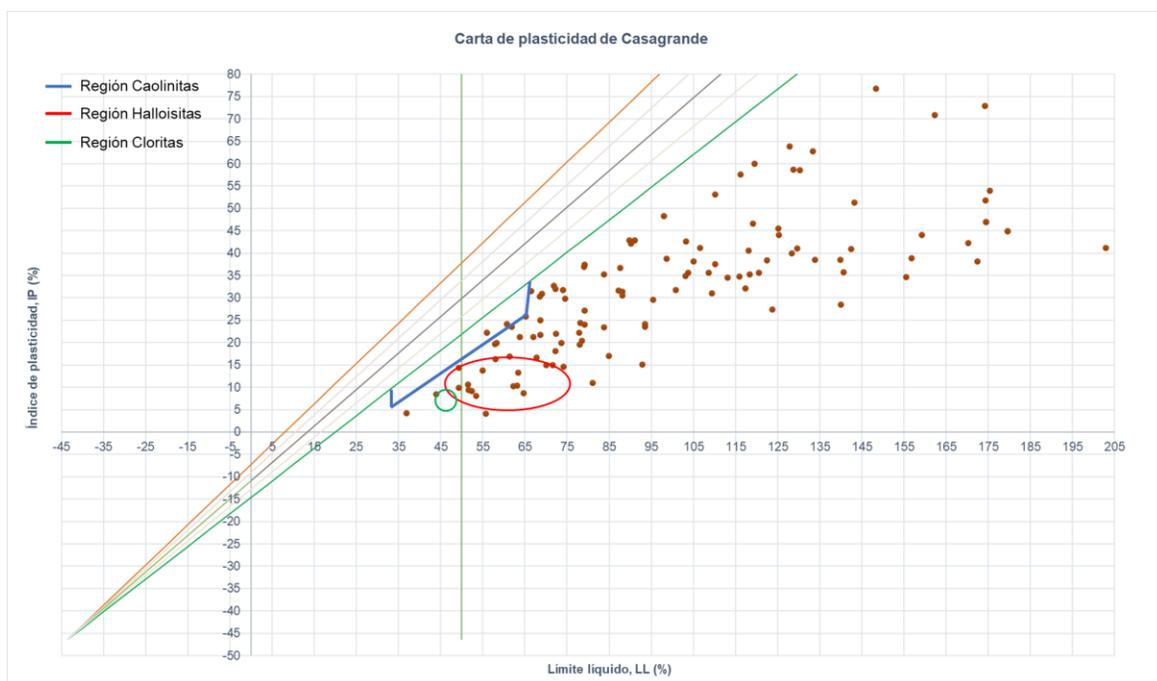
**Figura 63.** Gráfico de dispersión de las muestras con N de campo superior a 30 golpes, para Índice de Plasticidad (%) vs. Qu (KN/m<sup>2</sup>).

Al concentrar el análisis gráfico en las muestras asociadas a consistencia media y firme, se evidencia un aumento en la regresión lineal, que pasa a ser de 0,101 (Figura 64), sin embargo, continúa siendo un valor muy bajo para definir un patrón de comportamiento de las variables evaluadas.

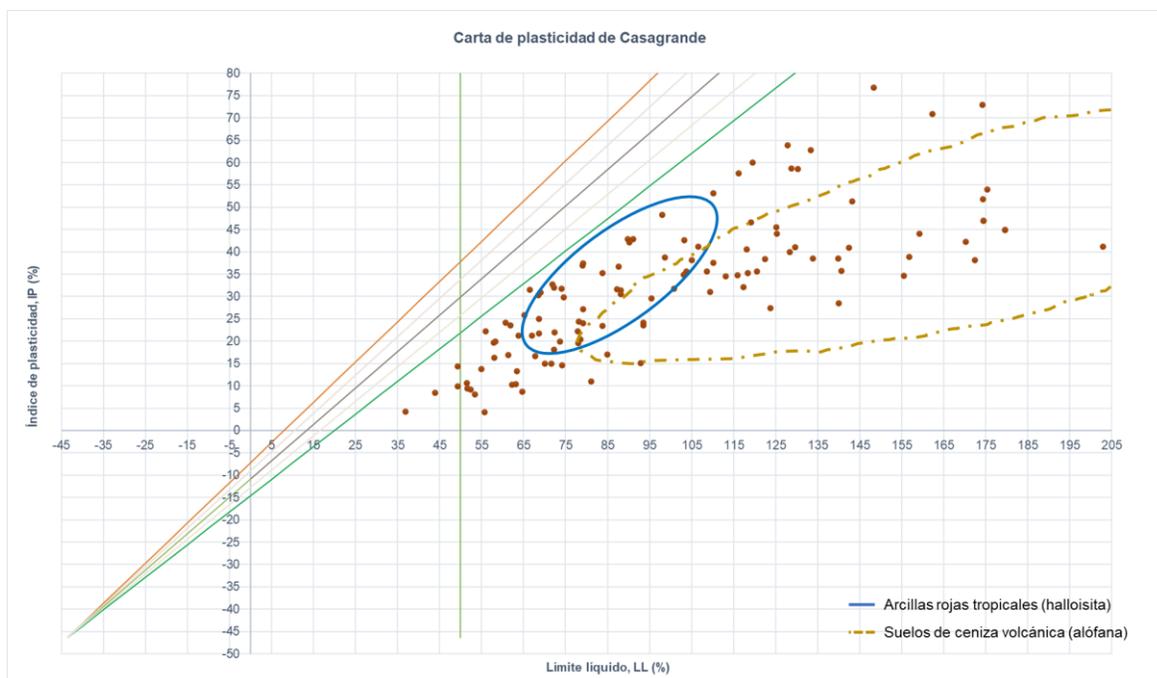


**Figura 64.** Gráfico de dispersión de las muestras con N de campo superior a 30 golpes para Índice de Plasticidad (%) vs. Qu (KN/m<sup>2</sup>), cuya consistencia se caracteriza como media y firme.

Para la revisión de los posibles minerales contenidos en las muestras, se ubicaron los 115 puntos en la carta de plasticidad de Casagrande modificada por Mitchell en 1976 (Figura 65) y en la carta de plasticidad modificada por Wesley en 1973 y 2010 (Figura 66). Para la primera carta solo se identificaron 16 puntos en las áreas de halloisitas (14) y caolinitas (2), mientras que en la segunda carta, 38 puntos se ubicaron en la región de asociada a arcillas rojas tropicales (halloisita), y 44 en el área de suelos de ceniza volcánica (alófana).



**Figura 65.** Carta de plasticidad de Casagrande modificada por Mitchell (1976), en la cual se localizan las muestras con N de campo superior a 30 golpes.



**Figura 66.** Carta de plasticidad de Casagrande modificada por Wesley (1973, 2010), en la cual se localizan las muestras con N de campo superior a 30 golpes.

## 6. Discusión

En esta unidad, dedicada a la discusión de resultados presentados en el capítulo previo, se hace un análisis interpretativo de los mismos. Se empieza por señalar que los hallazgos encontrados se soportan en la calidad que reviste la información secundaria facilitada y los datos primarios obtenidos. Por consiguiente, el grado de resolución y de correlación observado entre variables depende en gran medida de la rigurosidad con la que fueron determinados en fuente, los datos que describen las distintas variables comparadas.

Así, por ejemplo, se aprecia que las relaciones entre variables, por rangos de profundidad a las que fueron tomadas las muestras, respecto del nivel del terreno, enseñan muy bajo grado de correlación. Una primera explicación de este resultado es que, dada la topografía sinuosa y/o abrupta de la municipalidad de Manizales, es evidenciable que, en un mismo rango de profundidad, se presenta un espectro variado de geomateriales muy diversos y, consecuentemente no revela una clara tendencia entre las variables comparadas, sino que refleja una alta dispersión de los datos y por lo tanto una baja correlación estadística de los mismos.

Por otra parte, pese a que se trabaja con sedimentos volcánicos, no puede afirmarse que los diferentes horizontes de geomaterial de esta naturaleza que puedan existir en los distintos sitios explorados pertenezcan a las mismas erupciones; es decir, no puede afirmarse que sean depósitos isocrónicos que pudiera explicar, de alguna forma, la similitud o diferencia composicional encontrada.

Adicionalmente, es altamente probable que los sedimentos piroclásticos que han caído sobre el área de Manizales, hayan experimentado diferentes procesos geológicos y en distintos grados de severidad, con posteridad a su deposición, dependiendo del sitio en que fueron sedimentados; tampoco es fácil identificar y diferenciar los procesos naturales y/o antrópicos que pudieron afectar en algún grado las composiciones y por ende las propiedades de los materiales volcánicos.

## **6.1 Análisis de la caracterización de geomateriales en laboratorio y su verificación en campo**

En general, los materiales volcánicoclásticos recién erupcionados suelen ser de textura gruesa, sin embargo, una vez depositados sufren procesos severos de meteorización fisicoquímica y degradan hacia suelos residuales limosos y arcillosos de origen volcánico. Lo descrito podría explicar la clasificación textural de las muestras evaluadas (216 catalogadas como suelos finos: limos y arcillas y 77 como suelo granular predominantemente arenoso con un porcentaje relevante de finos).

Es pertinente mencionar que la textura (tamaño de partícula) per se presenta limitaciones para confirmar que un sedimento es ceniza volcánica; es necesario considerar información sobre su ambiente formacional, mineralogía, densidad, consistencia, entre otros datos (Lizcano et al., 2006). Por ello, en la metodología seguida y descrita en el Capítulo 4 de este informe técnico de la investigación, fue indicado que para verificar que las 293 muestras seleccionadas correspondan a cenizas volcánicas, se hizo revisión de la información contenida en cada uno de los 68 estudios con respecto a los registros de perforación y el componente geológico, se georreferenciaron los puntos explorados en el mapa geológico que muestra las formaciones superficiales aflorantes en el municipio de Manizales y, se hicieron jornadas de campo con acompañamiento de expertos geológicos para corroborar la presencia de suelos volcánicos.

Con base en las comprobaciones efectuadas se deduce que los datos geotécnicos de laboratorio tomados de diversas fuentes y evaluados en el Capítulo 5 corresponden a geomateriales volcánicos. Esta premisa dio paso al análisis de la caracterización de los geomateriales contrastando la descripción de sus propiedades índice con referentes bibliográficos y analizando su comportamiento geomecánico.

Un referente importante para la verificación de los valores en los que oscilan algunos de los parámetros obtenidos en laboratorio, se muestra en la Tabla 7 (contenida en el componente teórico) realizada por Herrera (2006), en la cual se enseñan rangos asociados a cenizas volcánicas en Colombia. Consecuentemente, en la Tabla 17 se revela aquellas propiedades presentes en las muestras estudiadas, y se agrega una fila resaltada en rojo y enumerada

como [32], incluyendo la variación de los datos correspondientes a contenido de humedad natural, Límite Líquido, Límite Plástico, peso unitario seco, y cohesión no drenada (obtenida del ensayo de resistencia a la compresión inconfínada), para cenizas volcánicas en el área urbana de Manizales.

Se observa que la humedad natural se encuentra dentro de los rangos reportados para Colombia. Por su parte, el Límite Líquido (LL) de las cenizas procedentes del área urbana de Manizales enseña un nuevo valor mínimo (34%), el cual es inferior al previamente establecido (37%). De conformidad con los valores de esta variable, superiores a 50%, mayormente los suelos evaluados califican como geomateriales de “Alta compresibilidad – H”, lo cual implica que los asentamientos debidos a consolidación son un factor que debe considerarse cuidadosamente en los estudios geotécnicos conducentes a definir la cimentación de edificaciones.

Respecto del Límite Plástico (LP), las distintas muestras evaluadas definen un nuevo límite superior del rango para esta variable, establecido para cenizas volcánicas en Manizales (162%). La determinación (ensayo) de este parámetro en laboratorio tiene una alta carga de subjetividad, lo cual afecta de alguna forma la exactitud del Índice de Plasticidad (Guerrero & Cruz, 2018), y el grado de certidumbre en cuanto a rangos exactos.

El peso unitario seco de las cenizas volcánicas de Manizales mostró en esta investigación un valor tope ( $17,4 \text{ KN/m}^3$ ), superando el registro indicado en la referencia ( $13,8 \text{ KN/m}^3$ ), y el conocido para cenizas volcánicas de otros países.

La cohesión o resistencia no drenada ( $S_u$ ) determinada a partir de prueba no consolidada no drenada (UU) o ensayo de resistencia a la compresión inconfínada, muestra en los suelos volcánicos de Manizales un valor mínimo sumamente bajo de  $4 \text{ KN/m}^2$ , muy inferior al referenciado para otros países. Generalmente, los suelos volcánicos poseen una alta cementación y, esta condición se asocia con alta resistencia “in situ”, con tendencia a mostrar falla súbita o comportamientos frágiles, pese a su connotación de alta resistencia (Galvis, 2018).

**Tabla 17.** Propiedades índices en suelos derivados de ceniza volcánica (Herrera, 2006), modificada con los rangos de valores obtenidos en el presente estudio, para el área urbana del municipio de Manizales.

Propiedades	Colombia		Otros países		
$w_o$	80 – 200%	[3]	50 – 300%	Indonesia	[30]
	16 – 90%	[1]	50 – 100%	India	[21]
	29 – 119%	[31]	102 – 205%	Japón	[7]
	25 – 177%	[32]	40 – 50%	Japón	[13]
			27 – 184%	Japón	[11]
$w_L$	52 – 64%	[4]	70 – 110% predomina haloisita	Indonesia	[28]
	60 – 70%	[14]	85 – 190% predomina alófana	Indonesia	[28]
	120 – 250%	[17]	95 – 107% predomina haloisita	New Guinea	[12]
	37 – 117%	[31]	156 – 165% predomina alófana	New Guinea	[12]
	34 – 203%	[32]	179 – 187%	Indonesia	[29]
			80 – 213%	India	[21]
			72 – 159%	Japón	[20]
			105 – 107%	Ecuador	[10]
			31 – 40%	Japón	[13]
$w_p$	27 – 33%	[4]	55 – 75%	Indonesia	[28]
	45 – 50%	[14]	65 – 150%	Indonesia	[28]
	70 – 150%	[17]	65 – 73%	New Guinea	[12]
	25 – 90%	[31]	119 – 129%	New Guinea	[12]
	29 – 162%	[32]	139 – 149%	Indonesia	[29]
			40 – 100%	Japón	[20]
			17 – 20%	Japón	[13]
$\gamma_d[kN/m^3]$	8,70 (limo arenoso)	[24]	4,0 – 7,2	Japón	[7]
	10,7 (arena limosa)	[24]	3,8 – 12,7	Japón	[11]
	7,0 – 8,4	[4]	7,9 – 9,8	Fiji	[8]
	4,5 – 13,8	[1]	4,3 – 7,6	Java	[25]
	5,7 – 13,8	[31]			
	4,7 – 17,4	[32]			
$S_u[KPa]$	26 – 309	[1]	65 – 200	Indonesia y	[30]
	25 – 135	[14]	100 – 230	New Zealand	
	4 – 190	[32]	20 – 160	Japón	[9]
			Japón	[23]	

Nota: [1] Arango, 1993, [3] Forero et al., 1999, [4] IGAC (1996), [7] Kitazono et al., 1987, [8] Knight, 1986, [9] Maeda et al., 1977, [10] Mendoza, 1985, [11] Miura, 2003, [12] Moore and Stylez, 1988, [13] Moroto, 1991, [14] Olarte, [17] Rivera J.D., 2003, [20] So, 1998, [21] Rao, 1995, [23] Sahaphol and Miura, 2005, [24] Terlien, 1997, [25] Van Ranst et al., 2002, [28] Wesley, 1977, [29] Wesley, 2001, [30] Wesley, 2003, [31] Herrera, 2006, [32] Datos recopilados para 293 muestras de ceniza en el área urbana de Manizales en el presente estudio, 2022.

Uno de los criterios para evaluar el grado de expansividad de la arcilla es analizar los rangos en que están las propiedades índices plásticas (Límite Líquido, Límite de Contracción, e Índice de Plasticidad). La Tabla 18 condensa el potencial de expansión de las 293 muestras

de suelos volcánicos de Manizales evaluadas en la presente investigación, en función de valores promedio, máximo y mínimo de las propiedades índices enunciadas anteriormente.

**Tabla 18.** Evaluación de potencial de expansión en función del valor promedio, mínimo y máximo de Límite Líquido, Índice de Plasticidad y Límite de Contracción para las 293 muestras evaluadas.

	<b>LL (%)</b>	<b>Potencial de expansión</b>	<b>IP (%)</b>	<b>Potencial de expansión</b>	<b>LC (%)</b>	<b>Potencial de expansión</b>
<b>Promedio</b>	85,4	Muy alto	25,6	Alto	39,3	Bajo
<b>Mínimo</b>	34,2	Bajo	3,5	Bajo	20,7	Bajo
<b>Máximo</b>	202,9	Muy alto	89,6	Muy alto	87,2	Bajo

Los valores máximos de Límite Líquido, Índice de Plasticidad y Límite de Contracción califican las muestras de suelo volcánico como suelos de alto potencial expansivo. Mientras tanto, el valor promedio del Límite Líquido califica el potencial de expansión como muy alto, el valor promedio del Índice de Plasticidad describe el potencial de expansión como medio a alto, y el valor promedio del Límite de Contracción revela que el potencial de expansión es bajo. Por su parte, los valores mínimos de las tres variables catalogan como bajo el potencial expansivo de las muestras de suelo volcánico evaluadas.

Lo anterior sugiere que, del total de las muestras, hay una fracción de ellas que presentan alto potencial expansivo y otra que registran bajo poder hiperactivo. Sin embargo, hay muestras que no satisfacen simultáneamente todos los rangos establecidos para describir, con tales variables, el potencial expansivo.

Lo previamente descrito plantea que el hallazgo en materia de actividad expansiva de las muestras de suelo volcánico analizadas, al tenor de la información facilitada, no es concluyente.

En términos teóricos, atendiendo lo señalado por (Galvis, 2018), los suelos volcánicos poseen una alta cementación y condiciones de alta resistencia “in situ”, con tendencia a mostrar falla súbita o comportamientos frágiles. Esta observación podría sugerir, de una parte, un potencial expansivo bajo en suelos derivados de ceniza volcánica y, por otra parte, señala suelos con irreversibilidad a la rehidratación una vez han sido expuestos a desecación (Herrera, 2006). De acuerdo con estos criterios, podría decirse que solo los satisfacen las

muestras que enseñaron los valores mínimos de las variables descriptivas del potencial expansivo, calificado como bajo.

## **6.2 Correlación de datos zonificados según criterio de profundidad de procedencia de las muestras, clasificación SUCS, y N de campo en ensayo SPT**

### **6.2.1 Minerales presentes en las cenizas volcánicas según propiedades índices de plasticidad**

La posición del suelo en la Carta de Plasticidad de Casagrande modificada por Mitchell y otros autores, permite identificar los minerales de arcilla, entre otros minerales, existentes en el suelo estudiado. El análisis aquí realizado se basa en los resultados obtenidos comparados con: (1) los rangos definidos por Mitchel & Soga (2005), presentados en la Tabla 3 del presente documento, donde se tienen valores mínimos y máximos para el Límite Líquido e Índice de Plasticidad, que los relacionan con los minerales de arcilla: montmorillonita, nontronita, illita, caolinita, halloisita hidratada, halloisita deshidratada, atapulgita, clorita, y alófana (sin secar), (2) la carta de plasticidad de Casagrande modificada por Mitchell (1976), contenida en la Figura 10 del mismo capítulo, la cual identifica regiones para montmorillonitas, illitas, caolinitas, halloisitas y cloritas, y (3) la carta de plasticidad modificada por Wesley (1973, 2010), que se encuentra en la Figura 11, donde se tienen áreas asociadas a montmorillonitas, arcillas rojas tropicales (halloisitas), y suelos de ceniza volcánica (alófana).

La Tabla 19 y Tabla 20 condensan los posibles minerales de arcilla contenidos en las 293 muestras evaluadas (sectorizadas en función de su profundidad), teniendo en cuenta los rangos de Mitchel & Soga (2005), de acuerdo con los valores promedio de Límite Líquido e Índice de plasticidad respectivamente.

En términos del valor promedio del Límite Líquido de las muestras, se aprecia que 69 de 293 ejemplares (23,6%) extraídos a partir de 9 metros de profundidad, contienen Montmorillonita como mineral de arcilla, el cual es considerado de alta hiperactividad. La totalidad de las muestras, independientemente de la profundidad de procedencia, enseñan un contenido de Illita, y con excepción de las muestras extraídas a profundidad mayor a 15

metros, hay especímenes con caolinita como mineral de arcilla básico. En este último grupo, especial mención se hace con las muestras situadas superficialmente (0 a 3m) que revelan presencia de halloisita.

**Tabla 19.** Evaluación de los posibles minerales de arcilla en las 293 muestras, de acuerdo con los rangos de Límite Líquido establecidos por Mitchel & Soga (2005).

Profundidad (metros)	Número de muestras Total: 293	Límite Líquido (%)	Montmorillonita	Nontronita	Illita	Caolinita	Halosita hidratada	Halosita deshidratada	Atapulgita	Clorita	Alófana (sin secar)
			100 - 900	37 - 72	60 - 120	30 - 110	50 - 70	35 - 55	160 - 230	44 - 47	200 - 250
0 - 3	75	69,2		X	X	X	X				
3 - 6	96	76,1			X	X					
6 - 9	53	97,9			X	X					
9 - 12	34	103,9	X		X	X					
12 - 15	27	107,7	X		X	X					
15 - 21	8	110,1	X		X						

Al analizar la presencia de minerales de arcilla y otros en función del Índice de Plasticidad (Criterio de Mitchel & Soga), se ve que las muestras procedentes de profundidades entre 3 y 6 m contienen nontronita. Los especímenes extraídos a partir de 6 metros de profundidad contienen caolinita, y de este grupo, las muestras tomadas a 9 metros o más de profundidad, enseñan presencia de halloisita deshidratada. Curiosamente, con la variable Índice de Plasticidad no se encontraron muestras con contenido de illita o montmorillonita.

**Tabla 20.** Evaluación de los posibles minerales de arcilla en las 293 muestras, de acuerdo con los rangos Índice de Plasticidad establecidos por Mitchel & Soga (2005).

Profundidad (metros)	Número de muestras Total: 293	Índice de Plasticidad (%)	Montmorillonita	Nontronita	Illita	Caolinita	Halosita hidratada	Halosita deshidratada	Atapulgita	Clorita	Alófana (sin secar)
			50 - 100	19 - 27	35 - 60	25 - 40	47 - 60	30 - 45	100 - 120	36 - 40	130 - 140
0 - 3	75	18,9									
3 - 6	96	23,3		X							
6 - 9	53	29,7				X					
9 - 12	34	31,8				X		X			
12 - 15	27	34,8				X		X			
15 - 21	8	32,4				X		X			

La Tabla 21 registra, comparativamente, para las propuestas de modificación de la Carta de Plasticidad de Casagrande, formuladas por Mitchell (1976) y por Wesley (1973, 2010), la

distribución porcentual de muestras reportadas en el Capítulo 5, con foco en la localización de los puntos en las regiones correspondientes a los diferentes tipos de minerales. Aquí solo se extrae el resumen de la sectorización por profundidad, dado que abarca las 293 muestras.

Se colige que las muestras extraídas de 0 a 6 metros de profundidad contienen, según Mitchell, los minerales de arcilla caolinita, halloisitas y cloritas, con dominio del segundo mineral nombrado. Por su parte, Wesley clasifica las muestras procedentes de ese mismo rango de profundidad, como arcillas rojas tropicales (halloisita) y suelos volcánicos (alófana), aumentando la concentración mineral con la profundidad.

De acuerdo con la Carta de Plasticidad modificada por Mitchell, en las muestras tomadas a 6 metros o más de profundidad (con excepción de las extraídas en la franja de 12 a 15 metros de profundidad), solo está presente la halloisita (un mineral de arcilla de la familia de las caolinitas, con estructura tubular).

En términos de Wesley, el número de muestras clasificadas como volcánicas (con contenido de alófana) aumenta al incrementar la profundidad, y las muestras clasificadas como arcillas rojas tropicales (con mineral de halloisita presente), no tienen una clara dependencia con la profundidad, presentándose la mayor concentración en las muestras tomadas en la franja de 12 a 15 metros de profundidad.

**Tabla 21.** Evaluación de los posibles minerales de arcilla en las 293 muestras, de acuerdo con la ubicación de las muestras en la carta de plasticidad de Casagrande modificada por Mitchell (1976) y Wesley (1973, 2010).

Sectorización	Rangos/ Clasificación	Número de muestras	Carta de plasticidad modificada por Mitchell (1976)			Carta de plasticidad modificada por Wesley (1973, 2010)	
			Caolinitas	Halloisitas	Cloritas	Arcillas rojas tropicales (Halloisita)	Suelos de ceniza volcánica (alófana)
<b>Por profundidad</b>	0 - 3	75	8%	35%	3%	13%	16%
	3 - 6	96	6%	24%	2%	27%	18%
	6 - 9	53	-	4%	-	23%	43%
	9 - 12	34	-	15%	-	29%	47%
	12 - 15	27	-	-	-	44%	59%
	15 - 21	8	-	13%	-	13%	75%

De acuerdo con Wesley (2010), los suelos volcánicos presentan Límite Líquido y Límite Plástico muy alto, que se reflejan en un Índice de Plasticidad bajo, y los sitúan muy por debajo de la Línea A en la Carta de Casagrande (Galvis, 2018), tal como se evidencia en el

presente estudio, donde los 293 puntos están por debajo de dicha línea. Según la carta de plasticidad modificada por Mitchell (1979) y por Wesley (1973, 2010), tanto la Montmorillonita como la Illita están por encima de la Línea A, por lo tanto, estos minerales no se asocian a los suelos estudiados.

En cuanto a la Caolinita, se evidencia un mayor ajuste al revisar las variables de Límite Líquido e Índice de Plasticidad, donde se tienen 285 muestras y 122 muestras respectivamente, en el rango que describe este mineral. Para el análisis gráfico por medio de la carta de plasticidad de Casagrande, Mitchell (1976) demarcó una región correspondiente a Caolinitas, donde se encuentra el 7% de las muestras, presumiendo que parte de los minerales contenidos en las cenizas volcánicas objeto de estudio, corresponden a Caolinitas.

La secuencia típica de meteorización propuesta por autores como Fisher & Schmincke, 1984; Murray et al., 1977; Wesley, 2002, indica que inicialmente el vidrio volcánico se transforma en alófana (Herrera, 2006), cuyo tiempo de vida antes de dar paso a partículas de arcilla cristalina (e.g. caolinita, montmorillonita) es de 25.000 años aproximadamente (Torres & Viveros, 2018).

En Colombia, los suelos de origen volcánico en la zona de Los Andes, parten de erupciones ocurridas durante los últimos 25.000 años, en el Pleistoceno y Holoceno del periodo cuaternario (Herrera, 2006), motivo por el cual predomina la presencia de alófana en estos suelos residuales; mineral que no tiene una composición o forma definida, exhibiendo una gran variedad de propiedades físicas (Mitchell, 1993), y determinando cómo interactúan las partículas entre sí, con los fluidos y el aire (Herrera, 2006).

Como se mencionó anteriormente, el vidrio volcánico es el principal componente de las cenizas. Su descomposición da origen a minerales arcillosos (haloisita, alófana e imoglita), presentes en la fracción submicroscópica (Herrera, 2006) y, que son responsables de las características de plasticidad y compresibilidad de los suelos volcánicos (Das, 2012).

Al evaluar la correspondencia de los resultados obtenidos para las muestras recopiladas en el presente estudio, con minerales asociados a halloisitas, se tiene que, según su Límite

Líquido, 75 muestras de la capa superficial (0 a 3 metros) están relacionadas con halloisita hidratada, mientras que según el Índice de Plasticidad las últimas 69 (entre 9 y 21 metros), se asocian a halloisita deshidratada. Por su parte, según la carta de plasticidad modificada por Wesley (1973, 2010), un promedio de 25% de los puntos se encierran en la región de halloisita (aquí no se diferencia si es hidratada o no), y en la carta de plasticidad modificada por Mitchell (1979), aproximadamente un 18% se asocia a la región de halloisita. Estas definiciones indican un mayor grado de ajuste a minerales de halloisita, según los autores evaluados, lo cual guarda sentido con la edad de los suelos de origen volcánico en Colombia, y los posibles minerales encontrados para estos.

Con respecto a la alófana, si se revisa el Límite Líquido e Índice de Plasticidad, no se tiene ninguna muestra en los rangos asociados al mineral, sin embargo, al mirar la ubicación de los 293 puntos en la carta de plasticidad modificada por Wesley (1973, 2010), un promedio de 43% de las muestras se encuentran en la región correspondiente a este mineral, lo cual también se ajusta al marco teórico revisado, y que en unión con las muestras localizadas dentro del área de halloisita (mencionadas en el párrafo anterior), permite describir los posibles minerales del 65% de las cenizas que hacen parte del presente estudio. La presencia de alófana confirma la caracterización de baja expansividad, dada por los cambios que presenta este mineral ante procesos de desecación, los cuales son irreversibles (Herrera, 2006).

La revisión del tipo de mineral predominante es pertinente debido a que la estructura de los suelos residuales de ceniza volcánica puede influir en su comportamiento plástico (Moon et al., 2017). Pese a que los suelos derivados de cenizas volcánicas son aparentemente no plásticos o de baja plasticidad en estado inalterado, al ser remoldeados exhiben comportamiento de suelos con elevada plasticidad y humedad (NZ Geotechnical Society, 2005), donde la alófana e imoglita aportan a dicho incremento de la plasticidad (Lizcano et al., 2006).

A medida que aumenta el contenido de alófana, también lo hacen los Límites de Atterberg del suelo (So, 1998; Van Rants et al., 2002; Herrera, 2006), y a su vez, las condiciones de secado impuestas antes del ensayo (tanto al aire como en horno), los reduce

irreversiblemente (Herrera, 2006). Lo aquí expuesto permite inferir que en las 293 muestras cuyos datos geotécnicos son evaluados en este estudio, el aumento de las variables geotécnicas Límite Líquido e Índice de Plasticidad con la profundidad, puede estar asociado a su naturaleza volcánica y por ende a un mayor contenido de alófana en los suelos.

### **6.2.2 Correlación entre los Límites de Atterberg y la resistencia a la compresión inconfina (RCI)**

Identificar la existencia de una posible correlación entre los Límites de Atterberg y la resistencia a la compresión inconfina de suelos catalogados como cenizas volcánicas, marcó el objeto de la presente investigación. En el sentido de encontrar la potencial correlación entre las variables mencionadas, se establecieron diagramas de dispersión de datos pertinentes a los 293 especímenes que integraron la muestra de análisis estadístico. De esta forma, se hicieron tres evaluaciones de correlación de tales variables, de acuerdo con los siguientes criterios (especificados en el Capítulo 5): profundidad de procedencia de las muestras, tipo de suelo según Clasificación Unificada, número de golpes del SPT.

Establecidos los diagramas de dispersión, se procedió a determinar la ecuación de correlación y a establecer el grado de resolución, aplicando herramientas de estadística descriptiva. En este ejercicio se probaron varias alternativas, representando en el plano cartesiano los puntos Límite Líquido vs. RCI e Índice de plasticidad vs. RCI, y determinando en cada caso, el grado de ajuste a comportamientos lineales, exponenciales, logarítmicos o potenciales, de acuerdo con la correlación ( $R^2$ ) correspondiente.

En una relación probabilística de datos, una X dada no siempre produce el mismo valor de Y, por cuanto los problemas no obedecen a una relación exacta. El análisis de regresión busca encontrar la mejor relación entre Y y X, cuantificando la fuerza de esa relación, usando métodos que permitan predecir valores de la respuesta dados por el regresor X (Walpole, et al., 2012). Puntualmente el coeficiente  $R^2$  es una medida del grado de bondad del ajuste o de fiabilidad del modelo de un grupo de datos, que oscila entre 0 y 1, es adimensional, de fácil cálculo e interpretación, el cual permite evaluar el modelo de regresión, obteniendo conclusiones válidas sobre su grado de ajuste al conjunto de observaciones (Martínez, 2005).

Las tablas 22 a 24 condensan los resultados obtenidos para el coeficiente  $R^2$  pertinente a correlación lineal, de acuerdo con cada uno de los criterios de agrupación definidos: por profundidad de procedencia de las muestras (Tabla 22), por clasificación SUCS de las muestras (Tabla 23) y por el Número de golpes del SPT (Tabla 24).

Un valor de  $R^2$  cercano a 1 indica un mejor ajuste del modelo respecto a la ecuación de tendencia evaluada. Un valor próximo a cero (0), sugiere una alta dispersión de los datos y por consiguiente, la inexistencia de una correlación aceptable entre las variables geotécnicas comparadas.

En la Tabla 22 se verifica la inexistencia de un comportamiento entre la RCI y la profundidad, mientras que los datos promedio de Límite Líquido e Índice de Plasticidad aumentan con la profundidad (excepto para el rango entre 15 y 21 metros, en el que el IP decae ligeramente), pero este comportamiento no refleja impacto alguno en el grado de correlación  $R^2$  de las ecuaciones que marcan la tendencia lineal analizada entre las variables comparadas (LL,  $Q_u$  e IP,  $Q_u$ ).

**Tabla 22.** Correlación lineal entre LL vs.  $Q_u$  e IP vs.  $Q_u$  en muestras de suelos volcánicos, evaluadas según su profundidad de extracción.

Por profundidad		Límite Líquido (%)			Índice de Plasticidad (%)			Resistencia a la compresión inconfiada (KN/m <sup>2</sup> )			R <sup>2</sup> (lineal) (%)	
Metros	Número de muestras	Min.	Prom.	Máx.	Min.	Prom.	Máx.	Min.	Prom.	Máx.	LL vs Qu	IP vs Qu
0 - 3	75	35,6	69,2	188	3,7	18,9	89,6	16,8	74,9	206,6	5,42	2,41
3 - 6	96	34,2	76,1	180,1	3,5	23,3	70,9	7,1	101,2	283,6	4,21	4,57
6 - 9	53	36,9	97,9	202,9	4,2	29,7	76,8	20,9	113,5	250,9	20,2	18,44
9 - 12	34	39,2	103,9	174,5	8,1	31,8	62,8	39,2	103,8	191,4	40,86	46,03
12 - 15	27	64,0	107,7	172,4	17,9	34,8	57,5	44,0	116,8	289,5	0,47	2,57
15 - 21	8	63,8	110,1	155,5	14,9	32,4	41,2	62,9	138,3	373,6	29,39	19,29

Para las profundidades de procedencia de las muestras comprendidas entre 0 y 6 metros y entre 12 y 15 metros, los valores hallados de  $R^2$  para las ecuaciones de ajuste lineal entre las variables correlacionadas resultaron considerablemente bajos, casi nulos, sugiriendo una alta dispersión de datos.

Para las muestras procedentes del rango de profundidad 6 a 9 metros, el grado de correlación  $R^2$  mejoró ligeramente (al 20,2% y 18,44%) entre las parejas de variables asociadas, pero sigue siendo inaceptable. Las muestras extraídas en el rango de profundidad 9 a 12 metros, revelan el valor más alto de regresión hallado (40,86% para LL vs.  $Q_u$ , y 46,03% para IP vs.  $Q_u$ ); valores de correlación que aún siguen siendo geotécnicamente bajos. Para las muestras en el rango 15 a 21 metros de profundidad, el valor de  $R^2$  de la tendencia de correlación lineal fue de 29,39% y 19,29% respectivamente, considerada muy baja.

La Tabla 23 enseña valores  $R^2$  considerablemente bajos para las ecuaciones de ajuste lineal entre las variables correlacionadas (Límite Líquido vs. resistencia a la compresión inconfínada e Índice de plasticidad vs. resistencia a la compresión inconfínada) en las muestras que fueron clasificadas como MH o SM.

**Tabla 23.** Correlación lineal entre LL vs.  $Q_u$  e IP vs.  $Q_u$  en muestras de suelos volcánicos, evaluadas según Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

Por clasificación SUCS		Límite Líquido			Índice de Plasticidad			Resistencia a la compresión inconfínada (KN/m <sup>2</sup> )			R <sup>2</sup> (lineal) (%)	
Tipo de suelo	Número de muestras	Min.	Prom.	Máx.	Min.	Prom.	Máx.	Min.	Prom.	Máx.	LL vs $Q_u$	IP vs $Q_u$
MH	212	52,3	96,9	202,9	8,6	30,9	89,6	16,8	108,1	373,6	3,55	4
SM	75	34,2	56,1	108,6	3,5	11,8	38,1	7,1	76,5	184,4	3,14	4,18

Se destaca una mayor cantidad de puntos en la categoría de limos de alta compresibilidad (MH), que en la categoría de suelos clasificados como arenas limosas (SM). Sin embargo, el comportamiento lineal de correlación, en cada categoría, para las variables geotécnicas comparadas, es definitivamente bajo y similar, variando entre 3,1 y 4,2%, mostrando un valor mayor de  $R^2$  para los suelos particulados (SM).

Los suelos clasificados como arcillas, son de alta compresibilidad (LL superior al 50%), y la componente fina limosa presente en los suelos granulares (arenas limosas), varía su compresibilidad de baja a alta. Como era de esperarse, la resistencia a la compresión inconfínada promedio de las muestras arcillosas, resultó mayor que en las arenas limosas. Sin embargo, en ninguno de los dos tipos de suelos se aprecia una tendencia definida de

comportamiento entre el Límite Líquido y la resistencia a la compresión inconfinaada, o entre el Índice de plasticidad y la resistencia a la compresión inconfinaada.

La categorización por rangos de N del SPT mostrada en la Tabla 24, registra una cantidad similar de muestras en cada uno de los intervalos definidos: de 15 a 30 golpes, y superior 30 golpes. Las variables correlacionadas revelan mayores valores a mayor número de golpes del SPT. No obstante, la regresión lineal es igualmente muy baja ( $R^2 \leq 6.12\%$ ).

**Tabla 24.** Correlación lineal entre LL vs.  $Q_u$  e IP vs.  $Q_u$  en muestras de suelos volcánicos, evaluadas según rangos de N del SPT.

Por SPT	Número de muestras	Límite Líquido			Índice de Plasticidad			Resistencia a la compresión inconfinaada (KN/m <sup>2</sup> )			R <sup>2</sup> (lineal) (%)	
		Min.	Prom.	Máx.	Min.	Prom.	Máx.	Min.	Prom.	Máx.	LL vs Qu	IP vs Qu
15 - 30	132	34,2	80,0	180,1	3,5	21,3	66,2	7,1	89,0	271,7	4,71	6,12
> 30	115	36,9	99,6	202,9	4,2	32,1	76,8	21,5	118,9	373,6	3,62	4,75

Adicionalmente, se probó establecer otro tipo de tendencia para cada categorización (exponencial, logarítmica, potencial, polinómica de grado 2), entre las variables geotécnicas mencionadas (LL, IP,  $Q_u$ ). Generalmente, la tendencia lineal mostró mejor correlación, pese a ser considerablemente baja. En la Tabla 25 se enseñan solo los rangos que presentaron una correlación más alta que la tendencia lineal, especialmente de tipo polinómico de grado 2, polinómico de grado 3 y logarítmicas, lo cual fue evidenciable en las muestras extraídas en los rangos de 9 a 12 metros y entre 15 y 21 metros, en el análisis según tipo de suelo para geomateriales clasificados como MH, y en muestras asociadas a N del SPT variando de 15 a 30 golpes. Pese a tener, en estos casos especificados, un  $R^2$  mayor que el hallado en tendencia lineal, sigue siendo bajo, con excepción del análisis IP vs  $Q_u$  definido para muestras extraídas en el rango de 15 a 21 metros, para las cuales la correlación correspondiente a tendencia polinómica de grado 3 dio un  $R^2$  de 92,6%.

Es pertinente señalar que el caso de  $R^2$  próximo a 1, anteriormente descrito, solo correlacionó 8 puntos, mientras que en el análisis restante, el número de muestras varió de 27 a 212.

**Tabla 25.** Síntesis de correlación no lineal entre Límite Líquido vs.  $Q_u$  e Índice de Plasticidad vs.  $Q_u$  en muestras de suelos volcánicos, evaluadas según profundidad de extracción, Sistema Unificado de Clasificación, y N del SPT. Evaluación para tendencias polinómicas de grado 2, de grado 3, y logarítmicas.

Sectorización	$R^2$		Tipo	$R^2$	
	LL vs $Q_u$ (%)			IP vs $Q_u$ (%)	Tipo
Por profundidad (metros)	9 - 12	48,3	Ec. Polinómica grado 2	48,95	Logarítmica
	15 - 21	43,7	Ec. Polinómica grado 2	92,6	Ec. Polinómica grado 3
Por clasificación SUCS	MH			5,25	Ec. Polinómica grado 2
Por SPT	15 - 30	7,31	Ec. Polinómica grado 2	8,26	Ec. Polinómica grado 2

Los bajos valores hallados de  $R^2$  (salvo la excepción descrita) para las distintas tendencias de correlación establecidas, revelan un resultado que sentencia, al menos para la información geotécnica primaria, utilizada en el metaanálisis propio de la presente investigación, la inexistencia de una tendencia correlacional entre las variables Límite Líquido vs. resistencia a la compresión inconfínada e Índice de Plasticidad vs. resistencia a la compresión inconfínada, para el tipo de suelo volcánico analizado. Un mayor nivel de investigación y refinamiento en la generación de datos en fuente, así como en el procesamiento de datos y el análisis de nuevas categorizaciones y evaluación de suelos volcánicos de otras latitudes, podrían ir afirmando o rebatiendo la conclusión preliminar aquí enunciada

Sobre el resultado obtenido surgen varias reflexiones, así: un error común en la interpretación de  $R^2$  es no considerar el tamaño muestral, ya que el mencionado coeficiente suele variar de forma inversa respecto al número de datos. En muestras pequeñas puede conllevar a aceptar una tendencia lineal entre dos variables, cuando realmente la correlación entre ellas dista de tal comportamiento (Martínez, 2005). En el metaanálisis efectuado en la presente investigación, la categorización en la cual se encontró un valor de  $R^2$  próximo a 1, correspondió a un tamaño de muestra con bajo número de datos (8 en total), lo cual no da suficiente confiabilidad, máxime cuando en los demás grupos o categorías, con una muestra mayor de datos, no se registró un comportamiento correlacional similar entre las variables comparadas.

Lizcano et al., (2006), destacan que las cenizas volcánicas son susceptibles de variar su morfología y textura durante el proceso de erupción – transporte – depositación, y que los suelos residuales derivados de cenizas volcánicas se desarrollan por procesos de alteración

física y química mediante procesos y reacciones que involucran disolución, lixiviación y precipitación de compuestos, que modifican la forma y tamaño de partículas, sus minerales y la porosidad. Consecuentemente, los patrones dispersos de depositación y los mecanismos geológicos tiempo dependientes de alteración, se asocian con la alta variabilidad espacial de los suelos encontrados (tanto en profundidad como en superficie).

Esta consideración se evidenció al efectuar el análisis por rangos de profundidad de procedencia de las muestras, donde se observan dispersiones muy altas de los datos asociados a cada rango, lo cual dificulta el establecimiento de una ecuación constitutiva que relacione las variables geotécnicas estudiadas en el marco de la presente investigación exploratoria.

El relieve del ambiente geográfico de depositación de cenizas volcánicas, influye en el espesor del depósito (i.e. en geoformas onduladas o planas, los depósitos registran mayor espesor que en zonas de alta pendiente (Lizcano et al., 2006). De hecho, la ciudad de Manizales se caracteriza por una topografía abrupta asociada a un relieve muy irregular, y esta condición permite inferir la existencia de una alta variabilidad geológica, hasta el punto en el que, en un mismo rango de profundidad, aun en sitios relativamente próximos, se puede tener diferentes procesos geológicos y una alta variación composicional litológica o de perfil de suelo. Por otra parte, dentro de los alcances de la investigación, no se contempla el análisis de la diferenciación cronológica de los procesos de depositación de cenizas volcánicas, y puede ocurrir que en sitios relativamente cercanos se tengan depósitos de cenizas de diferentes fuentes y de distintas edades de depositación, lo cual hace más difícil el establecimiento de correlaciones entre variables geotécnicas.

Todos los datos disponibles y procedentes de distintas locaciones del área urbana de Manizales fueron categorizados en función del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, y respecto del número de golpes en el ensayo SPT, mostrando igualmente muy bajos valores de correlación y consecuentemente no se señaló tendencia definida de comportamiento entre variables.

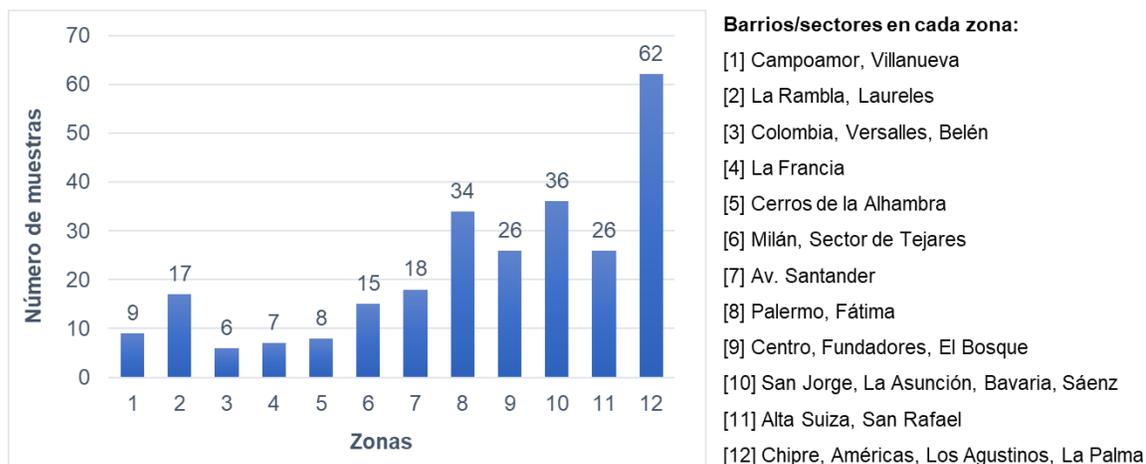
Otros aspectos de análisis que pueden explicar la inexistencia de una tendencia bien definida entre las variables geotécnicas LL vs  $Q_u$  e IP vs  $Q_u$  con base en los datos geotécnicos disponibles, son:

- Los datos crudos utilizados proceden de pruebas de laboratorio vinculadas a estudios geotécnicos realizados por diferentes fuentes, por consiguiente, conllevan diferentes recursos de error e incertidumbre. Los documentos consultados ofrecen poca a nula información en relación con los ensayos base para determinar las propiedades índices y físico mecánicas de las muestras. Así, por ejemplo, no se encontró datos sobre el carácter inalterado o remoldeado de las muestras, la relación entre dimensiones de la probeta, el patrón de falla de las probetas ensayadas en prueba de compresión inconfiada, ni se proveyó información sobre el ángulo de superficie de falla, que podría indicar el grado de saturación, la condición de drenaje, la inclinación de la envolvente de falla, los valores de los parámetros de resistencia (cohesión y ángulo de fricción interna), entre otros aspectos.
- La distancia entre la fuente de erupción volcánica y el sitio de depositación implica una variación de espesores y de texturas.
- La edad de la depositación volcánica está asociada a una mayor cantidad de procesos geológicos de degradación, cementación, etc., del depósito. Un estudio geotécnico corrientemente no define la edad del depósito. Difícilmente, por métodos tradicionales, puede conocerse qué muestras de cenizas volcánicas situadas a la misma profundidad en sitios diferentes procedan de la misma fuente y/u obedezcan a eventos de depositación isocrónicos.
- El ambiente geográfico y geológico del sitio de depositación sugiere el carácter de los procesos geológicos que sufre el complejo volcánico depositado, por ejemplo, depósitos adyacentes a corrientes de agua superficial pueden estar disectados por estas.
- El grado de meteorización del depósito de cenizas volcánicas es geológicamente diferencial, con alta variación espacial y tiempo dependiente

### 6.2.2.1 Correlación entre los Límites de Atterberg y la resistencia a la compresión inconfina (RCI) con datos seleccionados por sectores del área urbana de Manizales

La revisión indicada integró 264 de las 293 muestras, distribuidas en 12 zonas de la ciudad de Manizales, integradas por barrios y/o sectores cercanos. Las 29 muestras que no hacen parte de este análisis son aquellas que, por su localización espacial, quedaron excluidas de las zonas seleccionadas.

Por cada grupo de datos asociados a cada zona, fueron situados los puntos ( $LL$ ,  $Q_u$ ) e ( $IP$ ,  $Q_u$ ) en los planos cartesianos que relacionan las dos variables, se evaluaron diferentes ecuaciones de tendencia correlacional entre ellas. Los valores  $R^2$  fueron muy bajos indicando una alta dispersión de los datos. La Figura 67 señala la cantidad de muestras que integran el conjunto de datos para cada grupo de barrios y/o sectores; algunas zonas congregaron de 6 a 18 puntos y otras áreas dispusieron de 26 a 62 puntos.



**Figura 67.** Cantidad de muestras en cada una de las 12 zonas definidas para agrupar los datos por barrio/sector.

Los resultados del análisis de correlación entre variables por sector se resumen en la Tabla 26, donde se destaca el grado de correlación entre variables, encontrado para tendencia lineal y polinomial de grado 4, ya que esta última fue el mayor valor de  $R^2$ .

**Tabla 26.** Valores de  $R^2$  para tendencias lineal y polinomial entre variables LL vs  $Q_u$  e IP vs  $Q_u$  de suelos volcánicos extraídos en diferentes zonas de la ciudad de Manizales.

Zona	Estudio #	Barrio / Sector	Número de muestras	Prof. (m)	LL prom (%)	IP prom (%)	Clasificación SUCS	Rango SPT (Golpes)	Qu (KN/m <sup>2</sup> )	R <sup>2</sup> (lineal)		R <sup>2</sup> (otras correlaciones)	
										LL vs Qu	IP vs Qu	LL vs Qu	IP vs Qu
1	11	Campoamor Villanueva	3	1,5 - 13,0	81,3	19,4	MH	15 - 30	88,03	0,0985	0,0576	0,3044	0,0988
	8		6									Pol. Gr. 4	Pol. Gr. 4
2	43	La Rambla	4	2,5 - 16,0	89,2	25,7	SM (8), MH (9)	15 - 30	107,87	0,0069	0,026	0,0907	0,0821
	62	La Rambla	1									Pol. Gr. 4	Pol. Gr. 4
	25	Laureles	12									Pol. Gr. 4	Pol. Gr. 4
3	9	Colombia	4	1,5 - 12,0	59,2	10,2	MH (4), SM (1), SC (1)	15 - 30	70,62	0,06	0,2337	0,9899	0,7678
	37	Versalles	1									Pol. Gr. 4	Pol. Gr. 4
	38	Belén	1									Pol. Gr. 4	Pol. Gr. 4
4	40	La Francia	2	2,0 - 4,5	78,8	27	MH (6), SM (1)	> 30	67,95	0,0389	0,002	0,4945	0,9386
	48	La Francia	5									Pol. Gr. 4	Pol. Gr. 4
5	Conjunto Cerrado Valles de la Alhambra		1	2,5 - 5	42,2	9	SM (6), MH (1), ML (1)	-	59,48	0,0042	0,0049	0,396	0,2057
	7	Cerros de la Alhambra	4									Pol. Gr. 4	Pol. Gr. 4
	65	Cerros de la Alhambra	3									Pol. Gr. 4	Pol. Gr. 4
	66	Cerros de la Alhambra	3									Pol. Gr. 4	Pol. Gr. 4
6	54	Milán	9	3,0 - 12,0	76,5	21	MH (9), SM (6)	15 - 30	81,2	0,4366	0,4959	0,5007	0,5972
	64	Milán	3									Pol. Gr. 4	Pol. Gr. 4
	28	Sector de Tejares	3									Pol. Gr. 4	Pol. Gr. 4
7	18	Av. Santander	3	1,5 - 15,5	97,3	25,2	MH (15), SM (3)	> 30	118,87	0,1984	0,1892	0,4058	0,2469
	20	Av. Santander	4									Pol. Gr. 4	Pol. Gr. 4
	34	Av. Santander	8									Pol. Gr. 4	Pol. Gr. 4
	68	Av. Santander	3									Pol. Gr. 4	Pol. Gr. 4
8	13	Palermo	8	1,5 - 15,0	92,7	32,2	MH (32), SM (2)	> 30	97,44	0,1327	0,1213	0,1881	0,18
	32	Palermo	6									Pol. Gr. 4	Pol. Gr. 4
	36	Fátima	7									Pol. Gr. 4	Pol. Gr. 4
	50	Palermo	9									Pol. Gr. 4	Pol. Gr. 4
9	60	Fátima	4	2,0 - 18,0	95,5	32,4	MH (21), SM (4), ML (1)	> 30	116,66	0,0563	0,0083	0,1348	0,1283
	24	Centro	13									Pol. Gr. 4	Pol. Gr. 4
	53	Centro	1									Pol. Gr. 4	Pol. Gr. 4
	10	Centro	6									Pol. Gr. 4	Pol. Gr. 4
	67	Fundadores	3									Pol. Gr. 4	Pol. Gr. 4
39	El Bosque	3	Pol. Gr. 4	Pol. Gr. 4									

Zona	Estudio #	Barrio / Sector	Número de muestras	Prof. (m)	LL prom (%)	IP prom (%)	Clasificación SUCS	Rango SPT (Golpes)	Qu (KN/m <sup>2</sup> )	R <sup>2</sup> (lineal)		R <sup>2</sup> (otras correlaciones)	
										LL vs Qu	IP vs Qu	LL vs Qu	IP vs Qu
10	21	San Jorge	3										
	22	(Detrás del colegio Los Ángeles)	10				MH (27),						
	15	La Asunción	4	1,5 - 20,0	87,4	22,2	SM (8),	> 30	104,8	0,2615	0,3543	0,2821	0,3738
	58	La Asunción	1				SC (1)						
	16	Bavaria	12										
	30	Sáenz	2										
	51	Sáenz	4									Pol. Gr. 4	Pol. Gr. 4
11	1	Alta Suiza	9										
	12	Alta Suiza	1										
	14	Alta Suiza	7	1,5 - 12,5	94,7	26,2	MH (23),	15 - 30	103,7	0,0111	0,0244	0,1084	0,2188
	29	Alta Suiza	3				SM (3)						
	41	Alta Suiza	4										
	6	San Rafael	2									Pol. Gr. 4	Pol. Gr. 4
12	2	Chipre	8										
	3	Chipre	2										
	33	Chipre	6										
	42	Américas-Chipre	11										
	49	Chipre	20										
	55	Chipre	3	1,5 - 15	86,4	29,8	MH (43),	> 30	110,38	0,0141	0,0479	0,0542	0,0585
		Sector de Los					SM (19)						
	23	Agustinos	5										
	61	Los Agustinos	1										
19	Las Américas	3											
26	La Palma	3									Pol. Gr. 4	Pol. Gr. 4	

A continuación, se resume lo evidenciado para cada zona:

- **Zona 1. Campoamor y Villanueva:** fueron tratados datos correspondientes a 9 muestras. La correlación lineal mostró para las variables LL vs.  $Q_u$  un valor de  $R^2$  de 9,85% y para las variables IP vs.  $Q_u$  un  $R^2$  igual a 5,76% (valores considerados muy bajos, que no sugieren una tendencia correlacional con buen grado de confiabilidad). Al tratar una tendencia polinomial de grado 4, el  $R^2$  para LL vs.  $Q_u$  resultó en 30,44% y para IP vs.  $Q_u$  fue de 9,88%; valores que siendo mayores, no son confiablemente aceptables.
- **Zona 2. La Rambla y Laureles:** se contó con 17 muestras. La correlación lineal enseña para las variables LL vs.  $Q_u$  un valor de  $R^2$  de 0,69% y para las variables IP vs.  $Q_u$  un  $R^2$  igual a 2,6% (valores muy bajos que no respaldan una tendencia correlacional confiable). Al tratar una tendencia polinomial de grado 4, el  $R^2$  resultó en 9,07% para LL vs.  $Q_u$  y de 8,21% para IP vs.  $Q_u$ ; valores mayores, pero con un grado de confiabilidad inaceptable.
- **Zona 3. Colombia, Versailles y Belén:** fueron procesados datos asociados a 6 muestras. La correlación lineal mostró para las variables LL vs.  $Q_u$  un valor de  $R^2$  de 6% y para las variables IP vs.  $Q_u$  un  $R^2$  igual a 23,37% (valores considerados muy bajos de tendencia correlacional). La tendencia polinomial de grado 4 indicó un  $R^2$  para LL vs.  $Q_u$  del 98,99% y para IP vs.  $Q_u$  de 76,78%, valores que representan un alto grado de confiabilidad.
- **Zona 4. La Francia:** se trabajó con 7 datos. La correlación lineal mostró para las variables LL vs.  $Q_u$  un valor de  $R^2$  de 3,89% y para las variables IP vs.  $Q_u$  un  $R^2$  igual a 0,2% (valores muy bajos, que no sugieren una tendencia correlacional confiable). La tendencia polinomial de grado 4 indicó un  $R^2$  para LL vs.  $Q_u$  del 49,85% y para IP vs.  $Q_u$  de 93,86%, valores que representan un grado de confiabilidad de nivel medio a bueno de aceptación. Las muestras evaluadas proceden de profundidades bajas, variando entre 2 y 4,5 metros.
- **Zona 5. Cerros de la Alhambra:** fueron tratados 8 datos. La correlación lineal mostró para las variables LL vs.  $Q_u$  un valor de  $R^2$  de 0,42% y para las variables IP vs.  $Q_u$  un

$R^2$  igual a 0,49% (valores muy bajos, que no sugieren una tendencia correlacional confiable). La tendencia polinomial de grado 4 indicó un  $R^2$  del 39,6% para LL vs. Qu y de 20,57% para IP vs. Qu. Los dos valores son de bajo grado de confiabilidad.

- **Zona 6. Milán:** se dispuso de 15 datos. La correlación lineal mostró para las variables LL vs. Qu un valor de  $R^2$  de 43,66% y para las variables IP vs. Qu un  $R^2$  igual a 49,59% (fueron los mayores valores encontrados de confiabilidad media para tendencia lineal). La tendencia polinomial de grado 4 indicó un  $R^2$  para LL vs. Qu del 50,07% y para IP vs. Qu de 59,72%, valores con grado medio de confiabilidad.
- **Zona 7. Av. Santander:** la base constó de 18 datos. La correlación lineal presentó para las variables LL vs. Qu un valor de  $R^2$  de 19,84% y para las variables IP vs. Qu un  $R^2$  igual a 18,92%, considerados bajos. La tendencia polinomial de grado 4 indicó un  $R^2$  para LL vs. Qu del 40,58% y, para IP vs. Qu de 24,69%, valores con grado medio y bajo de confiabilidad.
- **Zona 8. Palermo y Fátima:** se presenta un alto número de muestras respecto de las consideradas en las zonas anteriores (34 puntos correspondientes a muestras extraídas a 1,5 y 15 metros de profundidad). La correlación lineal mostró para las variables LL vs. Qu un valor de  $R^2$  de 13,27% y para las variables IP vs. Qu un  $R^2$  igual a 12,13% (son valores bajos de confiabilidad para tendencia lineal). La tendencia polinomial de grado 4 indicó un  $R^2$  para LL vs. Qu del 18,81% y para IP vs. Qu de 18%, valores con bajo grado de confiabilidad.
- **Zona 9. Centro:** para las 26 muestras de esta zona, también se tienen regresiones sumamente bajas, especialmente para el comportamiento lineal, cuyo  $R^2$  indicó 5,63% para las variables LL vs. Qu y un valor  $R^2$  de 0,83% para las variables IP vs. Qu. Así mismo, la tendencia polinomial de grado 4 mostró un  $R^2$  bajo; para LL vs. Qu del 13,48% y para IP vs. Qu de 12,83%.
- **Zona 10. San Jorge, La Asunción, Sáenz:** es una de las zonas con alto número de muestras (36). La correlación lineal mostró para las variables LL vs. Qu un valor de  $R^2$  de 26,15% y para las variables IP vs. Qu un  $R^2$  igual a 35,43% (valores de confiabilidad

baja para tendencia lineal). La tendencia polinomial de grado 4 indicó un  $R^2$  para LL vs.  $Q_u$  del 28,21% y para IP vs.  $Q_u$  de 37,38%, valores con grado bajo de confiabilidad.

- **Zona 11. Alta Suiza y San Rafael:** con 26 muestras, la correlación mostró un  $R^2$  de 1,1% (bajo) para la ecuación que correlaciona linealmente las variables LL vs.  $Q_u$  y de 2,44% para la ecuación que correlaciona las variables IP vs.  $Q_u$ . La ecuación polinómica de grado 4 presenta un  $R^2$  bajo, de 10,84% para la ecuación que correlaciona las variables LL vs.  $Q_u$  y de 21,88% para la ecuación que correlaciona las variables IP vs.  $Q_u$ .
- **Zona 12. Chipre:** es la zona que concentra el mayor número de puntos (62 en total). Los valores de  $R^2$  se catalogan como muy bajos en los dos tipos de correlación. El  $R^2$  para las variables LL vs.  $Q_u$  fue de 1,41% y de 4,79% para la correlación de las variables IP vs.  $Q_u$ . La ecuación polinómica de grado 4 presenta un  $R^2$  bajo; de 5,42% para correlación de las variables LL vs.  $Q_u$  y de 5,85% para la correlación de las variables IP vs.  $Q_u$ .

La concentración de puntos en determinadas zonas es una muestra del mayor o menor grado de desarrollo urbano de la ciudad de Manizales, sustentado en estudios geotécnicos.

Puede apreciarse que la correlación lineal entre las variables LL vs.  $Q_u$  e IP vs.  $Q_u$  es generalmente muy baja, y por ende, no tiene un grado de confiabilidad aceptable. Igual comportamiento muestra el ajuste correlacional de tales variables, según tendencia polinomial de grado 4.

La presente investigación se suma a los esfuerzos científicos y académicos por entender el comportamiento correlacional de las variables geotécnicas propias de suelos volcánicos. Es de esperarse que los niveles de incertidumbre y el mejoramiento de la confianza estadística en ejercicios de correlación entre variables geotécnicas de tales suelos, mejore a medida que se superen los vacíos de conocimiento existente.

Bajo este panorama, ¿cuál es el paso final antes de llegar a una conclusión? Considerando que existen algunas ecuaciones validadas en el ámbito de la geotecnia, para la correlación de variables propias de los suelos, se procedió a revisar, para cada barrio, la correlación lineal definida por Bjerrum y Simons (1960), y consignada en la Tabla 6 del Fundamento

Teórico, la cual es aplicada en función de la relación entre los valores de  $C_u$  (determinados a partir de la prueba de resistencia a la compresión inconfiada, donde  $C_u = RCI/2$ ), la presión vertical efectiva de la sobrecarga ( $\sigma'$ ) y el Índice de Plasticidad (%), en arcillas sedimentarias normalmente consolidadas.

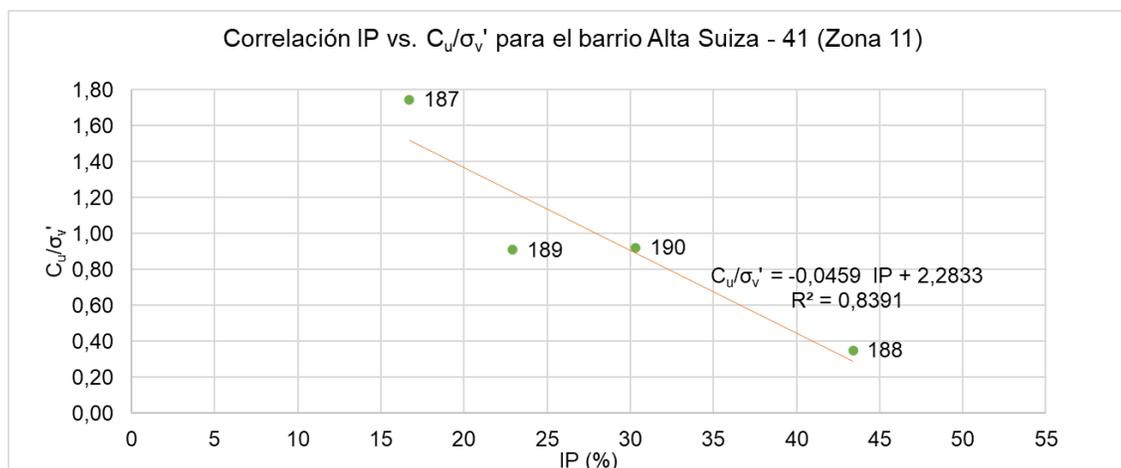
A partir de los datos disponibles sobre las variables geotécnicas involucradas en la expresión de Bjerrum y Simons (1960), se procuró establecer para los suelos volcánicos en análisis, la ecuación correspondiente.

Con el peso unitario, profundidad de la muestra, y localización del nivel freático, se determinó el esfuerzo efectivo para cada punto; con dicho parámetro y la cohesión no drenada registrada en los estudios geotécnicos base, se estimó el coeficiente de relación ( $C_u/\sigma'$ ). Luego, en el plano cartesiano  $C_u/\sigma'$  (ordenada) vs IP (abscisas) se posicionaron los puntos, creando el gráfico de dispersión para cada barrio. Posteriormente, se hizo análisis de tendencia por ecuación lineal y se determinó el coeficiente de ajuste o producto-momento o coeficiente de Pearson, el cual muestra el porcentaje en que el cambio de una variable influencia en la otra.

La Tabla 27 consigna la información sobre el análisis de dispersión para los datos del barrio Alta Suiza – 41, correspondientes a la correlación entre la razón de resistencia al corte sin drenaje  $\frac{c_u}{\sigma'_v}$  y el Índice de Plasticidad, y en la Figura 68 se muestra gráficamente. El **Anexo 4 – Gráficas de dispersión y cálculo de correlación lineal por barrio**, condensa la información correspondiente a los demás barrios que integran las zonas urbanas evaluadas.

**Tabla 27.** Análisis de dispersión para los datos del barrio Alta Suiza – 41.

# Barrio/Sector	Sondeo	# Muestra	Prof. (m)	NAF	$\frac{c_u}{\sigma'_v}$	IP (%)	Ecuación de correlación $\frac{c_u}{\sigma'_v} = f(IP)$	$R^2$
41 Alta Suiza	1	187	1,5	no	1,75	16,7	$\frac{C_u}{\sigma'_v} = -18.287IP + 46.313$	0,8391
		188	6	no	0,35	43,4		
	2	189	2	no	0,91	22,9		
		190	5	no	0,92	30,3		
		Promedio			0,983	28,3		



**Figura 68.** Correlación IP vs.  $C_u/\sigma_v'$  para las muestras procedentes del Barrio Suiza – 41.

Frecuentemente, el coeficiente de determinación  $R^2$  menor a 50% se considera bajo, y alto si es mayor a 50%. En el marco de este proyecto, se han establecido los siguientes rangos para efectos de la descripción del coeficiente: (1) menor a 20% = muy bajo, (2) entre 20% y 40% = bajo, (3) entre 40% y 60% = medio, (4) entre 60% y 80% = alto, y (5) mayor de 80% = muy alto.

Teniendo en cuenta esta carta de valores, en la Tabla 28 se resume la descripción de la confianza de la correlación para los 45 barrios que cuentan con más de una muestra, y allí se evidencia que más del 50% de estos presentan una cualificación entre baja y muy baja.

**Tabla 28.** Resumen de coeficiente  $R^2$  obtenido para los barrios evaluados.

Rango de $R^2$	Descripción de confianza de la correlación	Número de barrios en cada categoría	Acumulado	Distribución porcentual
Mayor de 80	Muy alta	4	4	8.89
60 - 80	Alta	8	12	17.78
40 - 60	Media	4	16	8.89
20 - 40	Baja	8	24	17.78
Menor a 20	Muy Baja	21	45	46.67

En todas las zonas puede observarse la alta dispersión mostrada para los datos IP vs.  $C_u/\sigma_v'$ , reflejada en los bajos valores de correlación  $R^2$  hallados. Varias razones podrían explicar la dispersión de los datos: de una parte, en algunos estudios geotécnicos consultados, el número de muestras ensayadas referenciadas fue relativamente muy bajo y por ende, la representatividad de los datos es muy limitada. Esta limitante (estudios con una sola muestra referenciada) no permite hacer correlación alguna.

Los puntos que resultaron más alejados de la línea de tendencia (color naranja), corresponden en términos generales a muestras extraídas a profundidades relativamente superficiales, salvo algunas excepciones, como el estudio San Jorge – 22, en el que las muestras más distantes de la línea de tendencia IP vs.  $C_u/\sigma'$  están a profundidades entre 6 a 8 metros. Este hallazgo sugiere la inexistencia, al menos para los casos evaluados, de una inferencia de la profundidad de procedencia de la muestra respecto de la confiabilidad de la correlación lineal buscada.

Igual comentario puede indicarse al evaluar las variables Índice de Plasticidad, humedad natural y resistencia a la Compresión Inconfinada, usadas para determinar la correlación. Como fue indicado en líneas precedentes, hace falta en los documentos contentivos de los estudios geotécnicos analizados, más información que describa los ensayos realizados que permitieron describir las distintas propiedades de los suelos ensayados.

Así por ejemplo, en un geomaterial saturado y en condiciones teóricas de inexistencia de drenaje durante el ensayo de compresión simple, debiera verificarse el Criterio de Tresca (1868):

$$c_u = \frac{Q_u}{2} = (c_u)_{veleta} = (c_u)_{penetrómetro} \quad \text{Ecuación 12}$$

$$\frac{Q_u}{(c_u)_{veleta}} = \frac{Q_u}{(c_u)_{penetrómetro}} = 2 \quad \text{Ecuación 13}$$

La constante de proporcionalidad entre la resistencia obtenida mediante prueba de compresión inconfinada ( $Q_u$ ) y la resistencia al corte sin drenaje medida con veleta y con penetrómetro ( $c_u$ ) es frecuentemente inferior a 2. Este hallazgo sugiere la existencia de factores que castigan la resistencia a compresión simple (alteración de la muestra durante la extracción, tallado de las probetas, cumplimiento del requisito  $(\frac{L}{B})$  entre dimensiones de la probeta, posible ocurrencia de drenaje durante el ensayo, historia del suelo reflejado en el grado de consolidación y manifiesto en frecuentes microfisuraciones en el caso de suelos sobreconsolidados, etc). De hecho, la superficie de falla en la prueba de compresión inconfinada tendida a un ángulo diferente a  $45^\circ$ , penaliza el valor de la cohesión que resulta ser menor que el valor del cortante máximo.

Si la constante de proporcionalidad en la Ecuación 13 se aleja fuertemente de 2, menos fiable es el ensayo de compresión simple para determinar la resistencia al corte sin drenaje a partir de la expresión teórica  $c_u = \frac{q_u}{2}$ , y surgirá la necesidad de optar por realizar ensayos de compresión triaxial UU (no consolidado, no drenado).

La relación entre el cociente de la resistencia al corte sin drenaje y presión efectiva vertical ( $\frac{c_u}{\sigma'_{v}}$ ) es dependiente, no solo del confinamiento del terreno (representado por la presión efectiva de sobrecarga) sino también de la razón de sobreconsolidación (OCR). Infortunadamente, los estudios geotécnicos consultados, no mostraron mayor información sobre el grado de consolidación de los depósitos de suelos volcánico que permitiera conocer el OCR correspondiente y de paso tener una aproximación a la historia de esfuerzos de los suelos.

Existen distintas expresiones que correlacionan  $\frac{c_u}{\sigma'_{v}}$  con OCR. En suelos normalmente consolidados, la resistencia al corte sin drenaje es proporcional a la profundidad (OCR=1), salvo en muestras superficiales donde el suelo puede estar ligeramente sobreconsolidado por desecación.

Usualmente:

$$\frac{c_u}{\sigma'_{v}} = K_{NC} \quad \text{Ecuación 14}$$

$$c_u = (0.2 \text{ a } 0.4) * \sigma'_{v} \quad \text{Ecuación 15}$$

Cuando la resistencia a corte no drenada se determina mediante falla de núcleos a compresión inconfiada ( $\frac{q_u}{2} = c_u$ ), el “ $c_u$ ” es castigado a la baja debido a los causales relacionados en líneas previas; consecuentemente, el cociente ( $\frac{c_u}{\sigma'_{v}}$ ) resulta menor al esperado. Lo aquí dicho, sustenta los posibles valores empíricos de  $k_{NC}$  menores a 0,2.

En geomateriales finos sobreconsolidados (OCR>1), la resistencia al corte sin drenaje no es lineal con la profundidad, porque decrece la razón de sobreconsolidación OCR. En este caso, también son observables los defectos provocados por la reducción del cociente ( $\frac{c_u}{\sigma'_{v}}$ ) en arcillas NC.

### 6.3 Discusión final

En un intento por establecer correlaciones entre variables geotécnicas, fue analizada información primaria generada por diferentes laboratorios de Manizales, sobre muestras de suelos volcánicos depositados en el casco urbano de la ciudad, en el marco de los estudios geotécnicos realizados por diferentes consultores con fines de soportar la proyección de la cimentación de diferentes edificaciones. Datos primarios o crudos tomados de los informes geotécnicos referenciados correspondientes a 293 muestras distribuidas en 53 barrios y agrupados en 10 zonas en la geografía urbana de la municipalidad de Manizales, fueron objeto de análisis.

En primera instancia, la revisión documental permite señalar que no se encontró un patrón estándar en cuanto a la estructura de los informes geotécnicos y, si bien, en gran medida responden a los lineamientos dados en la NSR-10, en algunos casos hay desviaciones respecto de lo normado. Los informes presentan los datos geotécnicos crudos básicos, pero no muestran detalles sobre la forma como fueron obtenidos.

Al tenor del objetivo central de la investigación (Análisis de correlación entre los Límites de Atterberg y la resistencia a la compresión inconfínada de cenizas volcánicas típicas de los depósitos superficiales de suelos en Manizales, Colombia), se establecieron correlaciones entre las variables geotécnicas de resistencia a la compresión inconfínada y Límite Líquido, y resistencia a la compresión inconfínada e Índice de Plasticidad, teniendo en cuenta criterios de profundidad de muestreo, nomenclatura asignada según Sistema Unificado de Clasificación de Suelos y número de golpes de la prueba de penetración estándar incluida en cada estudio, obteniendo coeficientes de determinación  $R^2$  mayoritariamente bajos a muy bajos.

Los análisis de información se hicieron por zonas y por barrios, encontrando en el último caso nombrado una mejor respuesta de correlación entre variables geotécnicas; explicable por la mayor posibilidad de que las muestras analizadas correspondan a materiales volcánicos más próximos y por ende, más homogéneos geológicamente.

Por otra parte, acorde con Bjerrum y Simons (1960) se correlacionó por barrio dentro de cada una de las 10 zonas establecidas, la razón de resistencia al corte sin drenaje  $\frac{c_u}{\sigma'_v}$  y el Índice de Plasticidad. Al menos 8 estudios geotécnicos realizados en 53 barrios integrados en las 10 zonas solo mostraron datos crudos pertinentes a una (1) muestra, lo cual imposibilita el análisis de dispersión de datos. Los 45 estudios restantes registraron información para dos o más muestras, posibilitando hacer análisis de dispersión de datos. Es observable que el 64,44% de los datos de  $R^2$  se califican como bajos a muy bajos, en tanto que el 35,56% clasifica como medio a muy alto.

Las referencias bibliográficas sobre estimación estadística de parámetros geotécnicos parecen mostrar una tendencia frecuente hacia la determinación de los dos estadísticos típicos de las series de ensayos: media de la muestra y coeficiente de variación. En algunos de los informes correspondientes a los estudios geotécnicos evaluados en la presente investigación, es imposible hablar de análisis estadístico o estudios de correlación, dada la limitada cantidad de muestras ensayadas (una (1) en algunos casos, dos (2) en otros), y son muy pocos los que tienen una generosa cantidad de muestras. Aún los estudios que ofrecen suficientes datos, no hacen evaluación estadística de los mismos, ni análisis comparativos de valores procedentes de las mismas áreas evaluadas, no suele estimarse el valor característico superior e inferior aplicando coeficientes de dispersión sobre el valor medio muestral, tampoco se analiza o se justifica la decisión de tasar el tamaño muestral, lo cual merece la mayor importancia para definir de la mejor forma el número de ensayos recomendables en la muestra (serie de datos) requeridos para estimar cada parámetro y definir la función de distribución de probabilidad que mejor le representa.

La restrictiva limitación en el tamaño de muestras por estudio, no permite establecer los coeficientes de variación en terrenos homogéneos, menos aún en zonas geológica y topográficamente extensas y diversas, donde se espera que los coeficientes de variación obtenidos se incrementen considerablemente bastante con la heterogeneidad.

Lo minucioso en la generación de datos crudos (suficientes y necesarios, con bajo grado de incertidumbre en su determinación y con análisis de las diversas fuentes de error), influye en la estimación de valores característicos, y por ende, afecta la confiabilidad de los valores

de cálculo que finalmente se adopten para caracterizar geomecánicamente el comportamiento del geomaterial.

Los hallazgos en la presente investigación fueron contrastados con conceptos geotécnicos expuestos en textos y artículos técnicos por diferentes autores en relación con el comportamiento geomecánico de los suelos volcánicos. De este modo, se citan los siguientes planteamientos:

- El comportamiento mecánico de los suelos derivados de cenizas volcánicas es afectado significativamente por las características físicas, composición y estructura del suelo. La presencia de alófana, halloisita e imoglita, genera en estos una tendencia a formar agregaciones cementadas, con altas resistencias, pese a elevados límites de consistencia (Límites de Atterberg). Esta cementación ocurre por procesos de disolución y precipitación de compuestos presentes en los minerales (Herrera, 2006). Por tratarse de materiales cementados, estos suelos residuales presentan estructuras internas con propiedades y comportamientos atípicos (Torres & Viveros, 2018).
- Los minerales presentes en las cenizas volcánicas, poseen ciertas propiedades (tamaño, forma, carga eléctrica, energía superficial, etc.) particulares con respecto a los comúnmente encontrados en suelos sedimentarios (Lizcano et al., 2006), marcando un comportamiento geomecánico especial cuando se encuentran en presencia de agua: capacidad alta de retención de agua, humedades naturales elevadas, bajas densidades secas, ángulos de fricción altos y cambios en su estructura según el tipo de secado empleado (Sanhueza et al., 2011).
- Aunque se tienen algunas aproximaciones en función de tablas de referencia y la carta de plasticidad de Casagrande modificada, con respecto a los minerales que componen las muestras, se desconocen los procesos que pueden haber modificado el comportamiento de estas. Por este motivo, se optó por su agrupación por zonas, buscando un mayor ajuste en cuanto a esta variabilidad, sin embargo, no se tiene exactitud al respecto. La alteración de la condición in situ de este tipo de suelos, puede ser de carácter físico, generalmente producida por cambios de humedad, remoldeo o destrucción de la estructura natural, o de carácter químico, relacionada con los procesos

de disolución de compuestos y meteorización de los materiales primarios (Herrera, 2006)

- La mecánica de suelos clásica se enfoca en el estudio de suelos sedimentarios, y considera de forma general la influencia de la composición química y mineralógica en el comportamiento mecánico de los mismos (Torres & Viveros, 2018), pero no se tienen en cuenta las condiciones iniciales del material, las cuales influyen en la correcta caracterización de suelos residuales (Wesley, 2002).
- Las modelaciones geotécnicas para fines de ingeniería, requieren el uso de parámetros que generalmente demandan mediciones experimentales (como es el caso de los suelos analizados en este estudio), que se reflejan en alteración de las condiciones y desarrollo natural de los fenómenos de estudio (Herrera, 2006).
- Las propiedades físicas de los suelos volcánicos se modifican fácilmente después del secado, por lo que es difícil establecer relaciones entre sus propiedades índice y geomecánicas (Brandes & Nakayama, 2010; Wesley, 1990, 2003) (Galvis, 2018), y pueden diferir según las técnicas que se usan tanto en laboratorio como en la exploración geotécnica, dada su alta sensibilidad durante la fabricación de la muestra (Guerrero & Cruz, 2018).
- Los criterios para diseñar y construir estructuras geotécnicas, son inaplicables a los suelos derivados de ceniza volcánica, por lo cual es importante recurrir a métodos no convencionales para su caracterización, como como ensayos de mineralogía, medición de la capacidad de intercambio catiónico y conductividad eléctrica, que permitan analizar cómo influye su composición en el comportamiento general (Lizcano et al., 2016).
- En comparación con suelos sedimentarios de propiedades índice similares, los suelos derivados de ceniza volcánica exhiben una mayor resistencia (i. e., resistencia no drenada y ángulos de fricción), que no se correlaciona bien con sus Límites de Atterberg (Brandes & Nakayama, 2010; Wesley, 1990, 2003 (Galvis, 2018), lo cual soporta que, en suelos estudiados para el municipio de Manizales, no se evidencie esto tampoco.

## 7. Conclusiones

En términos de los objetivos específicos de esta investigación exploratoria (los cuales se cumplieron a cabalidad):

- Fueron descritas las características geológicas de las cenizas volcánicas depositadas superficialmente en el casco urbano de la municipalidad Manizales, a partir de información existente.

Pese a que se han realizado sendos estudios de caracterización de los suelos volcánicos en el ámbito mundial, aún subsisten vacíos de información para llegar a un mayor conocimiento de tales geomateriales. En Colombia, la mayor concentración de suelos de origen volcánico yace en la cordillera central, como quiera que la mayor parte de los volcanes en el territorio nacional están geográficamente situados en dicha cadena montañosa, sin querer significar la inexistencia de tales sedimentos en las otras dos cordilleras. Pese a existir estudios previos sobre comportamiento de los suelos volcánicos en distintos sectores del Eje Cafetero, aún se requiere un mayor nivel de investigación para tener una idea sobre el comportamiento geomecánico de estos suelos. Usualmente los suelos volcánicos presentan texturas porosas, y el vidrio volcánico y sus derivados (sílica gel), están presentes como cementantes de las partículas. Este aspecto merece ser estudiado en próximas investigaciones con mayor profundidad, habida cuenta que el mineral cementante modifica las características físicas de las cenizas, al aportarle al suelo volcánico un incremento en su resistencia, de modo tal que la resistencia del citado geomaterial, está representada por la resistencia que proporciona el esqueleto de este más la resistencia aportada por el cementante.

- Se hizo un análisis interpretativo de datos crudos de pruebas de laboratorio sobre muestras superficiales de cenizas volcánicas depositadas en el casco urbano del municipio de Manizales, procedentes de pruebas de laboratorio realizadas a tales muestras. La investigación se basó en la información disponible en los informes técnicos pertinentes a los estudios geotécnicos facilitados por distintas firmas de consultoría. Los

datos analizados fueron esencialmente Límites de Atterberg y resistencia a la compresión inconfiada (RCI) de los suelos volcánicos existentes en la ciudad de Manizales.

- Se realizó evaluación geotécnica cartográfica a partir de la interpretación de la posición de los puntos evaluados en la Carta de Plasticidad de Casagrande modificada por Mitchell, encontrando en algunas muestras concentración de minerales de arcilla caolinita, especialmente del tipo halloisita. Mayormente, las muestras califican como suelos volcánicos (concentración de mineral alófana) al ubicarse por debajo de la Línea A, dentro de los cánones descriptivos definidos por la carta de plasticidad modificada por Wesley en 1973 y 2010.
- Se evaluó, aplicando técnicas de regresión estadística, el nivel de interdependencia correlacional entre los valores de resistencia a la compresión inconfiada y los Límites de Atterberg, tomando en consideración tres tipos de categorización: profundidad de procedencia de las muestras, nomenclatura en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, y el valor de N del SPT. Los valores de coeficiente de determinación hallados fueron relativamente bajos a muy bajos. Complementariamente, se estableció la variabilidad entre la razón de resistencia al corte no drenado ( $\frac{c_u}{\sigma'_v}$ ) y el Índice de Plasticidad (IP), siguiendo el modelo formulado por Bjerrum y Simons. Aproximadamente el 64% de las muestras revelaron bajos a muy bajos valores de determinación (coeficientes  $R^2$ ), mientras que el 36% de las muestras enseñaron medio a muy alto grado de correlación.

Revisado el estado del conocimiento, y efectuadas las operaciones conducentes a establecer correlaciones entre los Límites de Atterberg y la resistencia a la compresión inconfiada de cenizas volcánicas típicas de los depósitos superficiales de suelos en Manizales, Colombia., se concluye que:

- La cantidad de datos disponibles por predios (procedentes de pruebas de campo y laboratorio asociados a los estudios geotécnicos tradicionales) en la municipalidad seleccionada, es insuficiente, sugiriendo dificultad en la estimación estadística de los parámetros geotécnicos. Frecuentemente, se compensa la escasez de datos en la experiencia del especialista geotécnico para estimar los valores característicos.

- Los análisis realizados se apoyan en los datos utilizados, los cuales se consideran válidos tal como fueron presentados, habida cuenta que hacen parte de estudios geotécnicos base para edificaciones actualmente en servicio. Sin embargo, en distintas partes de este documento se ha hecho referencia a la cantidad y calidad de la información, la cual siendo necesaria se considera insuficiente y, con algunos niveles de incertidumbre. Esta percepción se explica por cuanto no es clara la coherencia de los datos de muestras procedentes de un mismo predio y, aún, de un mismo sondeo. Así, por ejemplo, se esperaría que siendo homogéneo el geomaterial, se gane densidad y resistencia mecánica con la profundidad; sin embargo, en muchos casos tal comportamiento no es visible.
- La mayoría de las correlaciones existentes entre variables geotécnicas son específicas para cada geomaterial y están influenciadas por distintos factores externos, cada uno con un grado de afectación específico. De ahí, que no resulta muy recomendable aplicar correlaciones generales preestablecidas y preferentemente es conveniente estructurar a partir de los datos de laboratorio disponibles, las correlaciones locales para cada material.
- La naturaleza de los suelos volcánicos, al igual que la de otros geomateriales (i.e. permafrost, suelos residuales, suelos lacustres), parece que exigiera un manejo conceptual y el desarrollo de nuevas prácticas de laboratorio, a efectos de poderlos caracterizar, ya que las técnicas y los procedimientos de la geotecnia clásica comúnmente aplicados, no muestran ser lo suficientemente robustos para poder descifrar ciertas condiciones y comportamientos específicos que tienen estos suelos especiales. Esto hace que se vea plausible la propuesta de empezar a generar técnicas y procedimientos específicos para cada uno de los geomateriales, teniendo en cuenta su naturaleza y origen.
- Hace falta desarrollar plataformas o bancos accesibles de datos geotécnicos, al menos en las ciudades capitales, procurado destacar los aspectos de homogeneidad estructural y naturaleza de datos registrados.

En tales bancos de datos se puede consignar información pertinente a: campañas geotécnicas (entidad fuente, sitio geográfico y fecha de realización de los estudios), emplazamiento de procedencia de las muestras (coordenadas geográficas de los sondeos y profundidad de extracción), datos crudos de los resultados de cada prueba,

observaciones específicas sobre las características de los ensayos, descripción de los mecanismos de falla de las muestras, entre otros datos. Los bancos de datos deben ser complementados con la formulación estadística correspondiente que permita, una vez se tenga un tamaño muestra suficiente, estimar la media aritmética y analizar la dispersión de los datos, mediante la desviación típica o del coeficiente de variación.

- La correlación entre propiedades índices derivadas de los Límites de Atterberg (como Límite Líquido, Índice de Plasticidad) y la resistencia a la compresión confinada de cenizas volcánicas típicas de los depósitos superficiales de suelos en Manizales, Colombia, registra grados de determinación baja a muy baja.

Los resultados obtenidos sugieren la necesidad de ahondar en el conocimiento previo sobre el comportamiento de los terrenos como sistema en un área geográfica determinada, evaluando las diversas interacciones de los elementos que lo integran (suelo, agua, ecomedio, etc), para mejorar la fiabilidad del estudio y proyección geotécnicos.

- Si bien es importante la calidad de los datos de entrada y, por ende la estimación rigurosa de los parámetros geotécnicos involucrados en los modelos de cálculo para incrementar la confiabilidad de los estudios, no de menor importancia es el conocimiento y experticia en la interpretación y manejo de los aspectos que conllevan la variabilidad tiempo dependiente de las propiedades de los geomateriales volcánicos, dada su alta vulnerabilidad a procesos físicos y químicos de deterioro (mecanismos de falla, alteración mineralógica, degradación de textura, arrastre de finos por su interacción in situ con las redes de filtración, etc.).

Saber la trazabilidad fuente-sitio final de depositación de las cenizas, el espesor de los depósitos, la cronología de los eventos volcánicos que dieron origen a los depósitos de cenizas, la influencia de la morfología del terreno vaso de deposición de las cenizas en la definición de los espesores de los depósitos, el impacto de las actividades antrópicas (directas e indirectas) sobre la calidad geotécnica de los geomateriales volcánicos, entre otros aspectos, cobran turno en la necesidad de ser estudiados, para mejorar los criterios de evaluación del comportamiento de los suelos de origen volcánico.

Lo anteriormente expuesto, pretende indicar el amplio espectro y complejidad de los conceptos de rigurosidad, incertidumbre, recursos de error, fiabilidad que se involucran en estudios orientados a establecer correlaciones entre variables geotécnicas, habida cuenta del alto número de condiciones aleatorias intervinientes que deben monitorearse y/o controlarse.

De conformidad con Sampieri (2010), se resalta que: “los estudios exploratorios sirven para familiarizarnos con fenómenos relativamente desconocidos, obtener información sobre la posibilidad de llevar a cabo una investigación más completa respecto de un contexto particular, investigar nuevos problemas, identificar conceptos o variables promisorias, establecer prioridades para investigaciones futuras, o sugerir afirmaciones y postulados. Los estudios exploratorios en pocas ocasiones constituyen un fin en sí mismos, generalmente determinan tendencias, identifican áreas, ambientes, contextos y situaciones de estudio, relaciones potenciales entre variables, o establecen el “tono” de investigaciones posteriores más elaboradas y rigurosas. Estas indagaciones se caracterizan por ser más flexibles en su método en comparación con las descriptivas, correlacionales o explicativas, y son más amplias y dispersa. Asimismo, implican un mayor “riesgo” y requiere gran paciencia, serenidad y receptividad por parte del investigador. Las investigaciones exploratorias por lo general no llevan hipótesis”.

## **7.1 Recomendaciones**

Para desarrollo futuro, se proponen los siguientes proyectos:

- Crear un banco de datos de información geológica-geotécnica sobre los suelos volcánicos de la ciudad de Manizales; propuesta que puede ser extensiva a otras poblaciones del departamento de Caldas y de regiones del país localizadas en proximidad a volcanes fuente, en las que haya depósitos de cenizas volcánicas.

Esta plataforma debe, además de ser amigable, incluir el mayor número de datos relativos a las características geotécnicas físico-mecánicas, de clasificación de los suelos, y dinámicas, así como de pruebas directas y geofísicas de uso cada vez más creciente en las jornadas de exploración geotécnica (presiómetro, piezocono, placa de carga, vane test, Sísmica, Geoeléctrica, etc.).

La base de datos debe estar complementada con el software necesario para hacer el cálculo de valores característicos superior, inferior, promedio, las variaciones y el grado de dispersión de los datos, entre otros valores estadísticos. El diseño de la base de datos debe permitir que sea alimentada con la información que aporten los nuevos estudios geológicos y geotécnicos en los sitios evaluados, para establecer la función de distribución probabilística que mejor represente el comportamiento aleatorio de los diferentes parámetros geotécnicos, y sus correspondientes coeficientes de variación.

- Monitoreo de depósitos de suelos volcánicos. En razón a que la ciudad de Manizales está enclavada en el cordón volcánico de Colombia, es importante hacer seguimiento a cada erupción de los volcanes fuente, establecer la caracterización de las cenizas en término de distancia fuente-depósito y realizar el monitoreo de estos, de modo que puedan evaluarse en la línea de tiempo las características de cada uno y la forma como experimentan los procesos de meteorización.
- Determinar experimentalmente los ajustes que se deben hacer a las metodologías actuales para clasificar suelos de origen volcánico (Límites de Atterberg, granulometría), con miras a implementar nuevas técnicas y procedimientos que permitan caracterizar las propiedades índice de estos suelos de una forma más ajustada a la realidad del geomaterial.
- Consensuar, en el marco de un diálogo orientado por la academia, sin que se pierda la autonomía del consultor, un formato de mínimos estándares que debieran tener los informes técnicos pertinentes a los estudios de consultoría geotécnica.
- Hacer un metaanálisis de estudios realizados en diferentes latitudes sobre estadística geotécnica, especialmente sobre suelos volcánicos, en aras a identificar si las conclusiones obtenidas son o no aplicables a todo tipo de geomaterial.
- Evaluar la metodología propuesta en la presente investigación (que es de tipo exploratorio) y aplicarla a otros ámbitos urbanos y/o rurales, con el propósito de perfeccionarla.
- Caracterizar la composición química mineralógica de los suelos volcánicos de los diferentes depósitos existentes en la ciudad de Manizales y comparar los resultados con la aproximación a la composición química que ofrece el uso de la Carta de plasticidad de Casagrande modificada por Mitchell y Wesley, respectivamente.

- Para eliminar la heterogeneidad y complejidad de la información (que en la presente investigación exploratoria fue tomada de diversas fuentes), es necesario realizar un estudio que minimice la incertidumbre y el sesgo dado por la diversidad de origen de los datos. Un proyecto de esta naturaleza implica recursos económicos que soporten el trabajo de exploración de campo, el desarrollo del plan de laboratorio, la ejecución de las pruebas geofísicas y químico-mineralógicas pertinentes para caracterizar los geomateriales, y los honorarios del personal especialista en cada tema.

## 8. Referencias

- Aguirre, F.M., Ballesteros, H.F., Gutiérrez, J.C. y Montoya, M. (1993). Modelo tridimensional de las formaciones superficiales de Manizales. Tesis de grado. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, programa de Geología y Minas, Universidad de Caldas, Manizales.
- American Society for Testing and Materials. (2018). ASTM D4318-17e1. (<https://ensayosdelaboratoriosuelos.files.wordpress.com>)
- Arango Gartner, J. D., 1993. “Características generales y comportamiento geotécnico de las cenizas volcánicas en la zona del antiguo Caldas”. Facultad de Ingeniería. Universidad de Caldas.
- Aristizábal, J.A. y Mendoza, N.A. (2017). Obtención de propiedades mecánicas a partir de la relación  $V_p/V_s$  para depósitos superficiales de ceniza volcánica en Manizales Colombia. *Revista Espacios*, 38(32), 22.
- Bañón, L. y Bevíá, J. (2000). Manual de carreteras (Vol.2): construcción y mantenimiento. Enrique Ortiz e Hijos, Contrastista de Obras, S.A.
- Bernal, G., Cardona, O.D., Salgado, M.A. y Villegas, C. (2015). Actualización de la microzonificación sísmica de Manizales. VII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, 27 a 29 de mayo de 2015, Bogotá.
- Blázquez, A.R. (2016). Aplicabilidad del penetrómetro cónico en la determinación del límite líquido en suelos de baja y media plasticidad. Tesis de maestría. Universidad de Alicante, España.
- Bourdon, E., Eissen, J.P., Monzier, M., Robin, C., Martin, H., Cotton, J. y Hall, M. (2002). Adakite-like lavas from Antisana Volcano (Ecuador): Evidence for Slab Melt Metasomatism beneath the Andean Northern Volcanic Zone. *Journal of Petrology*, 43(2), 199-217.

- Calle, G., Barragán, G. (2014). Estadística descriptiva [presentación de diapositivas]. Facultad de jurisprudencia, ciencias políticas y sociales de la Universidad Central del Ecuador. (<https://es.slideshare.net/1710170521/descriptiva-parte-1>)
- Carretero, M.I y Pozo, M. (2008). Mineralogía Aplicada. Thomson. 406p.
- Carter, M. y Bentley S.P. (1991). Correlations of soil properties. Pentech Press. 130p.
- Corporación Autónoma Regional de Caldas, CORPOCALDAS. (2016). Plan de acción institucional 2016-2019: actualización del diagnóstico ambiental de Caldas. 158p.
- Das, B.M. (2001). Fundamentos de ingeniería geotécnica (4ª ed.). International Thomson Editores, S.A. 608p.
- Das, B.M. (2012). Fundamentos de ingeniería de cimentaciones (7ª ed.). Cengage Learning Editores, S.A. 819p.
- Galvis, A.C. (2018). Estudio del comportamiento esfuerzo – deformación – tiempo de un suelo derivado de ceniza volcánica. Tesis de maestría. Facultad de ingeniería, departamento de ingeniería civil y agrícola, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Hermosilla, M. A. (2010). Antecedentes de alofán y otros minerales en suelos derivados de cenizas volcánicas del sur de Chile. Departamento de ingeniería de obras civiles, Universidad de la Frontera, Chile.
- Herrera, M. C. (2006). Suelos derivados de cenizas volcánicas en Colombia: estudio fundamental e implicaciones en ingeniería. Tesis doctoral. Facultad de Ingeniería, departamento de ingeniería civil y ambiental, Universidad de los Andes, Bogotá.
- Holtz, D.R. y Kovacs, D.W. (1981). An Introduction to Geotechnical Engineering. Prentice-Hall, Inc. 746p.
- Ibáñez, J.J. y Manríquez, F.J. (2015). Los Andosoles (WRB 1998): Suelos Volcánicos. Un universo invisible bajo nuestros pies (blog). Madrid. (<http://www.madrimasd.org/blogs/universo>)

- Instituto de Estudios Ambientales, IDEA. (2005). Gestión de riesgos en Manizales: memoria histórica. (<http://idea.manizales.unal.edu.co>)
- Jiménez, J. y Justo, J. (1975). Geotecnia y cimientos: propiedades de los suelos y de las rocas (Vol.1). Editorial Rueda, Madrid. 470p.
- Laporte, G. (2018). La importancia de la selección de parámetros de resistencia para diseños geotécnicos: una crítica. XIII Congreso Nacional de Geotecnia, 5 y 6 de septiembre de 2018, Costa Rica.
- Leal, A.M., Badillo, R.A. y Pedroza, A.O. (2015). Influencia de la densificación de suelos arcillosos en su resistencia a la compresión confinada. Facultad de Ingeniería, programa de Ingeniería Civil, Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta.
- Lizcano, A., Herrera, M. C. y Santamarina, J.C. (2006). Suelos derivados de cenizas volcánicas en Colombia. Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil, 6(2), 167-198.
- Martínez, L., Valencia L., Ceballos, J., Narváez, B., Pulgarín, B., Correa, A., Navarro, S., Murcia, H., Zuluaga, I., Rueda, J. y Pardo, N. (2014). Geología y estratigrafía del Complejo Volcánico Nevado del Ruiz. Servicio Geológico Colombiano. 853p.
- Martínez, E. (2005). Errores frecuentes en la interpretación del coeficiente de determinación lineal. Real Centro Universitario Escorial-María Cristina. San Lorenzo del Escorial. Publicado en Anuario jurídico y económico Escorialense, XXXVIII. 315-332 / ISSN: 1133-3677
- Mitchell, J.K. y Soga, K. (2005). Fundamentals of Soil Behavior (3ª edición). John Wiley & Sons, Inc. 560p.
- Montoya, D.A. (2014). Estudio de la sensibilidad en suelos derivados de cenizas volcánicas en cuatro sitios del área de expansión urbana de la ciudad de Pereira. Tesis de grado. Facultad de Ingeniería, programa de Ingeniería Civil, Universidad Libre Seccional Pereira.

- Murcia, H. F., Cortés, G. P. y Hurtado, B.O. (2008). Métodos e integración de análisis granulométrico para depósitos volcániclasticos. Boletín Geológico. INGEOMINAS. 42(1-2), 129 -139.
- Murcia, H.F., Borrero, C.A., Pardo, N., Alvarado, G., Arnosio, M. y Scolamacchia, T. (2013). Depósitos volcániclasticos: términos y conceptos para una clasificación en español. Revista Geológica de América Central, 48,15-39.
- Naranjo, J.L. y Ríos, P.A. (1989). Geología de Manizales y sus alrededores y su influencia en los riesgos geológicos. Revista Universidad de Caldas, 10, 1-3.
- Nicomedes, E. (2018) Tipos de Investigación. (<https://core.ac.uk/download/pdf/250080756.pdf>)
- Norma I.N.V.E. – 127 (2013). Determinación de los factores de contracción de los suelos. (<https://es.scribd.com/document/363328893/INV-E-127-13-pdf>)
- Osorio. (2010). Apuntes de geotecnia con énfasis en laderas. Consistencia del Suelo - Límites de Atterberg - Límite Líquido. (<http://geotecnia-sor.blogspot.com>)
- Patiño, K.D., Pedroza, A.O. y Gallardo, R. (2017). Efecto del agua residual minera en las propiedades índices de suelos finos, determinadas a partir del Ensayo de Límites de Atterberg. Grupos de investigación Geoenergía y GIGMA, Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta.
- Plan de Ordenamiento Territorial de Manizales, POT. (2007). Alcaldía de Manizales. Diagnóstico Integral del Territorio: área urbana. Capítulo 1: suelo.
- Puy, A.J. (2005). Influencia de la temperatura en el Límite Líquido para suelos con diferentes índices de plasticidad. Tesis doctoral. Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona, España.
- Ramírez, J. y Murcia, H. (2016). Microscopía electrónica de barrido: aplicaciones a microfósiles calcáreos y cenizas volcánicas. Revista Tlamati Sabiduría, 7(2).

- Reglamento Colombiano de Construcción Sismoresistente, NSR-10 (2010). Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. Bogotá. 1625p.
- Rivera V. Juan D., (2003). Caracterización de las cenizas volcánicas en el Departamento del Quindío sometidas a condiciones de secado. Trabajo de Grado. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Los Andes.
- Sanhueza, C., Palma, J., Valenzuela, P., Araneda, O. y Calderón, K. (2011). Evaluación del comportamiento geotécnico de suelos volcánicos chilenos para su uso como material de filtro en la depuración de aguas residuales domésticas. Revista de la construcción, 10(2), 66-81.
- Santamarina, J. C. y Narsilio, G.A. (2001). Clasificación de suelos: fundamento físico, prácticas actuales y recomendaciones. 50 aniversario Sociedad Venezolana de Geotecnia. (<https://www.construccionenacero.com>)
- Sowers, G.B. y Sowers, G.F. (1970). Introductory soil mechanics and foundations (third edition). Macmillan Company. Editorial Limusa-Wiley S.A. 685p.
- Suárez, J. (1998). Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales. Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos, Universidad Industrial de Santander. 541p.
- Torres, J.C. y Viveros, L. (2018). Efectos de la estructura en las propiedades índice de un suelo residual derivado de ceniza volcánica. Tesis de pregrado. Facultad de ingeniería civil, Universidad Santo Tomás, Bogotá.
- Trujillo, J. D. y Cobos, D. (2017). Ensayo de compresión inconfinaada: variación en la resistencia al corte no drenado por cambios en el diámetro de las probetas. Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería, 108, 57-60.
- Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, UNGRD. (2016). Consolidado Atención de Emergencias. (<http://portal.gestiondelriesgo.gov.co>)

## **Anexo 1 – Base de datos**

Presenta la compilación de información en torno a localización y registros de perforación obtenidos en cada uno de los 68 estudios geológicos consultados. Las columnas indican también la fecha en la que se realizó el estudio, detallan el barrio al que corresponde, y el tipo de estudio (i.e. ampliación de bodega, edificio de apartamentos, remodelación, etc.)

#	Fecha	Dirección	Barrio	Descripción	Sondeo	Profundidad alcanzada (m)	Prof. Muestras ceniza (m)	Descripción registros de campo
1	abril de 2005	Cra 22 CII 75	Alta Suiza	Ampliación de bodega	1	8,2	5	Limo con algo de arena blanco amarillento, plástico, húmedo y duro
					2	8	1,5	Limo arenoso gris habano, plástico, húmedo y duro
							4	Limo arenoso café claro y habano, plástico, húmedo y duro
							7,5	Limo arenoso gris amarillento, plástico, húmedo y duro
					3	8,2	4,5	Limo arenoso gris azulado, plástico, húmedo y duro
			8	Limo con trazas de arena amarillo claro, muy plástico, húmedo y muy duro				
			8	Limo con algo de arena gris claro y blanco, plástico, húmedo y duro				
			1,5	Limo arenoso gris amarillento, plástico, húmedo y duro				
			3,5	Limo arenoso amarillo oscuro, plástico, húmedo y duro				
2	diciembre de 2009	CII 12 #13A-41	Chipre	Edificio de apartamentos	1	25	5	Limo arenoso amarillo café, muy plástico, húmedo y blando
					2	20,3	5	Limo arenoso amarillo claro, muy plástico, húmedo y blando
							14	Limo arenoso gris claro con vetas amarillas claras, muy plástico, muy húmedo y blando
					3	25	5	Limo arenoso café claro con concreciones ferrosas, muy plástico, húmedo y blando
							9	Limo gris claro con vetas negras, plástico, húmedo y blando
			14	Limo arenoso gris claro con vetas negras, muy plástico, muy húmedo y blando				
			9	Limo arenoso gris claro con vetas negras, plástico y blando				
			14	Limo arenoso amarillo claro, plástico, húmedo y blando				
3	octubre de 2006	Cra 9C #8-58	Chipre	Remodelación de vivienda	2	6	4	Arena limosa café clara, húmedo y semiblanda. Suelo natural
					3	6	4,8	Limo arenoso gris amarillento claro, plástico, húmedo y semiduro
4	julio de 2006	CII 31 #18-40	Las Delicias	Vivienda bifamiliar	3	8	1,5	Limo arenoso amarillo claro con pintas rojizas, plástico, húmedo y semiduro. Suelo natural.
							7	Limo arcilloso amarillo encendido, muy plástico, muy húmedo y duro
5	junio de 2010	CII 50 #20-64	El Sol	Construcción de edificios de apartamentos	3	10,2	8	Limo arenoso amarillo claro, plástico, muy húmedo y blando
6	mayo de 2009	Cra 22 #70-84	San Rafael	Ampliación de vivienda	1	6	2	Limo arenoso café amarillento, plástico, húmedo y blando
					2	8	7	Limo arenoso amarillo encendido con vetas y concreciones ferrosas, semiplástico, húmedo y blando
7	junio de 2008	Lote 37	Conjunto Cerrado Valles de la Alhambra	Construcción de vivienda	2	6,5	4,5	Arena limosa café oscuro con partículas de lapilli, muy húmedo y duro
8	mayo de 2009	CII 39 Cra 27	Villanueva	Proyecto villanueva	1	16,2	4	Limo arenoso café amarillento, plástico, húmedo y duro
					2	16,7	3	Limo arenoso café amarillento con vetas grises y amarillas, plástico, húmedo y duro
							7	Limo arenoso gris claro, muy plástico, húmedo y duro
					3	19,3	9	Limo arenoso amarillo encendido, plástico, húmedo y blando
							13	Limo arenoso amarillo encendido, plástico, húmedo y duro
			8	Limo arenoso amarillo café con pintas rojizas, plástico, húmedo y blando				
9	febrero de 2009	Cra 29B CII 48B	Colombia	Construcción de vivienda de 2 pisos	1	6	1,5	Limo arenoso café amarillento claro, plástico, muy húmedo y semiblando
					2	6	1,5	Limo arenoso gris claro, plástico, húmedo y blando
							4,5	Limo arenoso gris claro, plástico, húmedo y duro
					3	6	1,5	Limo arenoso gris claro, semiplástico, húmedo y blando. Suelo natural.
							11	Arena limosa gris café oscura, semiplástica, muy húmeda y blanda
10	enero de 2008	CII 20A #21-45	Centro	Edificio Lotería de Manizales	2	13,5	11	Arena limosa gris oscura, semiplástica, muy húmeda y blanda
					3	16,7	4	Arena limosa gris oscura, semiplástica, muy húmeda y blanda
							13	Arena limosa café clara, muy húmeda y blanda
							16	Limo arenoso gris con vetas amarillas, muy plástico, húmedo y duro
					4		12	Limo gris claro, muy plástico, muy húmedo y blando
			14	Limo arenoso gris claro con vetas café, muy plástico, muy húmedo y semiblando				
11	abril de 2008	CII 29 #27-15	Campoamor	Remodelación arquitectónica y estructural de vivienda	1	2,4	2	Limo arenoso café oscuro, plástico, húmedo y duro. Suelo natural.
					2	3,5	2,5	Limo rojizo con vetas amarillas, plástico, húmedo y semiblando.
					3	5,7	1,5	Limo arenoso gris claro, plástico, húmedo y semiblando. Suelo natural
12	noviembre de 2007	Cra 20 #74-06	Alta Suiza	Complemento de estudio de suelos para renovación de licencia	1	6	4,5	Limo arenoso café con vetas grises, muchos grumos y partículas granulares, plástico, muy húmedo y duro
13	febrero de 2008	CII 65B Cra 28	Palermo	Edificio Arce	1	10	3,5	Limo arenoso amarillo claro, plástico, muy húmedo y blando
							7	Limo arenoso amarillo encendido, muy plástico, muy húmedo y semiduro
					2	9,7	6,5	Limo con algo de arena amarillo encendido oscuro, muy plástico, muy húmedo y semiduro
					3	10	3	Limo arenoso gris claro con pintas amarillas, plástico, húmedo y duro. Suelo natural.
							7,5	Limo arenoso amarillo encendido, muy plástico y semiduro
			3	Limo arenoso gris claro con vetas café, plástico y duro				
			5	Limo arenoso gris oscuro y gris claro, plástico, húmedo y duro				
			4,5	Limo arenoso gris oscuro y gris claro, plástico, húmedo y duro				
14	octubre de 2009	Cra 17A #71-32	Alta Suiza	Edificio de apartamentos	1	10,3	4	Arena limosa café clara, plástica, húmeda y semiblanda
							8	Arena limosa rojiza con vetas blancas, negras y partículas granulares cuarzosas, húmeda y muy dura
					2	10,7	4,5	Limo arenoso café, semiplástico, húmedo y blando
							8	Limo arenoso café amarillento, muy plástico, húmedo y blando
					4	12,4	8	Limo arenoso café rojizo con partículas granulares, plástico, húmedo y muy duro
					5	12,5	4	Arena limosa café clara, semiplástica, húmeda y blanda
			8	Limo arenoso gris con pintas amarillas, muy plástico, húmedo y blando				
15	agosto de 2007	CII 51C Cra 17 #18-26	La Asunción	Ampliación de vivienda de 4 pisos	1	13,2	4	Arena limosa café, húmeda y semiblanda. Suelo natural.
					2	13,5	5	Limo arenoso amarillo café, húmedo y semiblando
					4	11,3	9	Limo gris y amarillo con vetas café, plástico, húmedo y semiblando
							11	Limo gris claro con vetas café y amarillo claras, presenta gránulos de color café, muy plástico, algo húmedo y muy duro
16	septiembre de 2010	CII 46 Cra 26	Bavaria	Edificio de tres pisos "La cuadrata"	1	20,3	4	Arena limosa café amarillento clara con vetas grises, semiplástica, húmeda y blanda. Suelo natural.}
							12	Limo arenoso amarillo encendido, muy plástico, húmedo y duro
							16	Limo arenoso amarillo claro, plástico, húmedo y duro
							20	Limo arenoso amarillo claro con vetas café, muy plástico, húmedo y duro
					2	20	7	Arena limosa amarillo clara, semiplástica, húmeda y blanda
			10,5	Limo arenoso amarillo encendido con vetas café, plástico, húmedo y semiduro				

					14		Limo arenoso amarillo claro con vetas y concreciones ferrosas, plástico, húmedo y duro	
				3	20,2	4	Arena limosa café amarillenta clara, semiplástica, húmeda y blanda. Suelo natural.	
						8	Limo arenoso amarillo claro, semiplástico, húmedo y duro	
						12	Limo arenoso café amarillento claro, plástico, húmedo y duro	
						20	Limo arenoso amarillo claro con vetas grises, muy plástico, húmedo y duro	
				4	18	3,5	Arena limosa café oscura, húmeda y semiblanda. Suelo natural.	
17	octubre de 2010	Cra 40 #55-49	Camilo Torres	Ampliación de vivienda	1	6	2	Arena limosa café amarillenta, húmeda y blanda
					2	6	1,5	Arena limosa café amarillenta, húmeda y blanda
							4	Limo arenoso amarillo café, plástico, húmedo y blando
				3	6	1,5	Arena limosa café amarillenta, húmeda y blanda	
						5	Arena limosa amarillo café clara, plástica, húmeda y blanda	
18	junio de 2007	Cra 23 #46-36	Av. Santander**	Construcción de vivienda	1	8	4	Limo arenoso gris amarillento, semiplástico y duro
					3	8,2	1,5	Limo arenoso café amarillento, semiplástico, húmedo y duro
							3	Limo arenoso gris claro, plástico, húmedo y semiduro
19	octubre de 2009	Cll 18 Cra 15	Las Américas	Edificio Las Américas	1	13,5	4	Limo arenoso café claro, semiplástico, húmedo y blando
					3	10,5	7	Limo arenoso café claro, plástico, húmedo y duro
					4	12,5	4	Limo arenoso café claro con vetas amarillas, muy plástico, húmedo y blando
20	junio de 2008	Cra 23 Cll 55A	Av. Santander**	Adecuación nuevo local Todoterreno	1	8,2	5	Arena limosa café amarillenta con vetas y concreciones ferrosas, semihúmeda y semiblanda
					2	8	4,5	Arena limosa café amarillenta, semiplástica y semiblanda
					4	8	1,5	Limo arenoso café amarillento claro, plástico, semihúmedo y blando
							4,5	Arena limosa café clara, semiplástica, húmeda y blanda
21	febrero de 2009	Cra 21 #46A-76	San Jorge	Ampliación de vivienda	1	6,2	1,6	Arena limosa café clara, húmeda y blanda. Suelo natural
					2	6	1,5	Limo arenoso amarillo café claro, plástico y duro. Suelo natural.
					3	6	1,5	Limo arenoso amarillo café claro, plástico y duro. Suelo natural.
22	abril de 2006	Cll 52 Cra 21	San Jorge (Detrás del colegio Los Angeles)	Túnel calle 52	1	12,2	4,7	Arena limosa amarillo rojiza, muy húmeda y dura
							10,5	Limo arenoso gris amarillo y blanco, plástico, muy húmedo y duro
							12	Limo amarillo claro y gris, plástico, húmedo y muy duro
				2	23,2	7	Limo arenoso gris claro y blancuzco, plástico, húmedo y duro	
							11	Limo arenoso gris verdoso y amarillento, plástico, muy húmedo y muy duro
							13	Limo arenoso amarillo grisáceo, muy plástico, húmedo y duro
				3	12,5	6	Limo arenoso amarillo, plástico, húmedo y duro	
							8	Limo arenoso amarillo oscuro, muy plástico, húmedo, duro
							10	Limo arenoso gris amarillento, lístico, muy húmedo y duro
							12,2	Limo gris claro y blancuzco., muy plástico, muy húmedo y duro
23	enero de 2006	Cll 17 #17-52	Sector de Los Agustinos	Edificio de apartamentos de cinco pisos	1	18,1	5	Limo arenoso amarillo encendido, muy plástico, húmedo y duro
					2	18	5	Limo arenoso amarillo encendido, muy plástico, húmedo y duro
					3	20	6	Limo arenoso veteadado amarillo claro y café claro, muy plástico, húmedo y muy duro
					4	22,3	6	Limo veteadado amarillo claro, muy plástico, muy húmedo y duro
					5	16	7	Limo arenoso café grisáceo con particular granulares, plástico, húmedo y muy duro
24	marzo de 2007	Cra 24 #30-28	Centro	Edificio Clementina	1	22,8	9	Limo arenoso blanco, muy plástico, muy húmedo y semiblando
							15	Limo arenoso amarillo claro, muy plástico, muy húmedo y duro
							18	Limo arenoso veteadado café claro, gris claro y amarillo, muy plástico, muy húmedo y duro
				2	22,3	6	Limo arenoso amarillo rojizo, plástico, húmedo y duro	
							15	Limo arenoso amarillo claro y gris claro, muy plástico y duro
							18	Limo gris café claro con pintas rojizas, muy plástico y muy duro
				3	20,7	9	Limo arenoso blanco con pintas amarillas, plástico y duro	
							15	Limo con algo de arena amarillo claro con pintas gris claras, muy plástico, muy húmedo y duro
				4	14,9	9	Limo arenoso gris claro, muy plástico, húmedo y duro	
							12	Limo café grisáceo claro, muy plástico, húmedo y duro
				5	18,7	4	Limo arenoso veteadado gris claro y amarillo encendido, plástico, húmedo y duro	
							10	Limo amarillo blancuzco con vetas grises, muy plástico y duro
							13	Limo arenoso amarillo encendido, muy plástico y duro
25	enero de 2006	Calle 66	Laureles	Edificio de apartamentos "Áticos del Cable"	1	20,2	5	Arena limosa amarillo grisácea, semiplástica y semidura
							7	Arena limosa amarillo grisácea, plástica y semidura
				2	20,2	9	Limo arenoso gris claro, plástico, húmedo y duro	
							13	Limo amarillo encendido, plástico, húmedo y duro
				3	25	10	Limo arenoso gris claro, plástico, semihúmedo y duro	
							12	Limo arenoso amarillo encendido, plástico, húmedo y duro
							14	Limo gris claro con pintas amarillas, plástico y duro al perforar
							15	Limo gris claro con pintas amarillas, plástico y duro al perforar
				4	25	6	Limo arenoso café amarillento con lapilli, húmedo y semiblando	
							15	Arena limosa gris amarillenta, plástica y dura
				5	20	13	Limo amarillo encendido, plástico, húmedo y duro	
							16	Limo arenoso amarillo claro, plástico, húmedo y duro
26	julio de 2008	Cra 16 #13-24	La Palma	Edificio de apartamentos	1	14,5	7	Limo arenoso amarillo encendido, plástico, húmedo y blando
					3	19,4	7	Arena limosa amarilla clara, plástica, muy húmeda y blanda
					5	15,9	7	Limo arenoso gris claro, plástico, muy húmedo y blando
27	diciembre de 2008	Chec	Marmato	Estudio de vulnerabilidad sísmica edificios Chec	2	6	1,5	Limo arenoso amarillo encendido con pintas gris claras, plástico, semihúmedo y blando.
28	septiembre de 2008	Detrás del batallón Ayacucho	Sector de Tejares	Construcción de vivienda	1	8,2	8	Arena limosa café amarillenta, húmeda y semidura
					2	8	5,5	Arena limosa café amarillenta, húmeda y semiblanda
							7,5	Limo arenoso amarillo café, plástico, húmedo y semiduro
29	septiembre de 2006	Mabe Colombia S.A.	Alta Suiza	Túnel de transporte bodega	1	13	7,5	Limo arenoso gris amarillento, plástico, muy húmedo y semiblando.
							12,5	Limo arenoso gris claro, muy plástico, muy húmedo y semiblando
					2	8	7	Limo arenoso café claro, muy plástico, muy húmedo y semiblando

30	abril de 2008	Cll 46 #20-38	Sáenz	Construcción de vivienda de tres pisos	1	16,1	6	Limo arenoso amarillo claro, semiplástico, húmedo y duro
							10	Limo arcilloso veteadado gris claro y amarillo pálido, muy plástico, húmedo y duro
31	noviembre de 2008	Cra 31E #43-19	El Palmar	Ampliación de vivienda	1	6	1,5	Limo arenoso amarillo café pálido, húmedo y blando
32	mayo de 2006	Cra 28C #71A-07	Palermo	Edificio de apartamentos	1	28,6	4	Arena limosa café amarillenta, húmeda y semiblanda
							7	Limo arenoso amarillo café, plástico y semiduro
					2	25	10	Limo arenoso gris claro, plástico, húmedo y duro
					4	24,6	10	Limo arenoso amarillo claro, muy plástico, húmedo y duro
					5	29,4	10	Limo arenoso amarillo encendido con pintas rojizas, muy plástico, húmedo y duro
					6	25	10	Limo arenoso amarillo café, húmedo y semiblando
33	noviembre de 2006	Av 12 de octubre #6-09	Chipre	Ampliación de local "La Teja"	1	6	1,5	Arena limosa café amarillenta, semiplástica, húmeda y semiblanda
							5	Limo arenoso café amarillento, plástico, húmedo y duro
					2	6	1,5	Arena limosa amarillo café clara, semiplástico, húmeda y semidura
							4	Limo arenoso café amarillento, plástico, húmedo y semiblando
					3	6	1,5	Arena limosa café amarillenta, húmeda y semidura
							3	Arena limosa café amarillenta, plástica, húmeda y semiblanda
34	febrero de 2007	Cra 23 Cll 51 y 52	Av. Santander	Edificio de apartamentos	1	25	14	Limo arenoso veteadado amarillo claro y amarillo encendido, muy húmedo y duro
					2	25	11	Limo arenoso amarillo claro, húmedo y semiblando
							14	Limo arenoso amarillo encendido, muy húmedo y duro
					3	22,5	11	Limo arenoso amarillo encendido, húmedo y duro
					4	21,3	12	Limo arenoso veteadado gris claro y amarillo encendido, plástico, húmedo y semihúmedo
							15,5	Limo arenoso amarillo encendido, húmedo y duro
					5	22,7	8	Limo con trazas de arena amarillo oscuro, muy plástico y duro
							10	Limo arenoso gris amarillento, plástico, muy húmedo y duro
35	abril de 2007	Centro integral comunitario E y alegría	El Caribe	Construcción de aula	1	6	1	Arena limosa amarillo café, húmeda y semiblanda. Suelo natural
					2	6	1,2	Limo arenoso gris claro, plástico, húmedo y semiblando
							4	Limo arenoso café claro, plástico, húmedo y semiblando
					3	6	1	Limo arenoso amarillo claro, algo húmedo y semiblando.
							3	Limo arenoso café claro, húmedo y semiblando
36	octubre de 2006	Cll 65 #30-41	Fátima	Ampliación de vivienda a cuatro pisos	1	10,8	6	Limo arenoso amarillo encendido, plástico, húmedo y semiduro
					2	11,4	1,5	Limo arenoso amarillo café, semiplástico y blando. Suelo natural
							5	Limo arenoso amarillo grisáceo, plástico, muy húmedo y duro
					3	15,6	3	Limo arenoso amarillo pálido, plástico y semiblando. Suelo natural
							8	Limo arenoso amarillo encendido, plástico, húmedo y duro
							10	Limo arenoso amarillo claro, plástico, húmedo y duro
					4	11,8	5	Arena limosa café oscura, suelo orgánico (homogéneo), húmeda y dura. Suelo natural
37	enero de 2019	Cra 24 #50-14	Versalles	Diagnostimed	4	8	7,5	Arena limosa
38	junio de 2019	Cra 24 #56-50	Belén	Clinica Santillana	2	15	12	Limo arcilloso gris vetas de óxido
39	diciembre de 2018	Cra 25 #13-11	El Bosque	Reconocimiento de estructura	1	6	2	Limo arenoso color café oscuro
					2	6	6	Limo arenoso color amarillo
					3	6	4	Limo arenoso color amarillo
40	enero de 2020	Cra 18A Cll 4C	La Francia	Conjunto cerrado Torres de La Francia	2	8	5	Limo arenoso gris amarillento con vetas rojizas, plástico, muy húmedo y semiblando
					4	5	4	Limo arenoso gris, plástico, muy húmedo, blando, apariencia de suelo natural
41	abril de 2015	Cll 76 #21-91	Alta Suiza	Remodelación de vivienda	1	6,2	1,5	Limo arenoso café grisáceo claro, plástico, húmedo y duro
							6	Limo arenoso café grisáceo claro, plástico, húmedo y duro
					2	6,3	2	Limo arenoso café claro grisáceo, plástico, húmedo y duro
							5	Limo arenoso café claro y habano, plástico, húmedo y duro
42	enero de 2015	Cll 12A #17-47	Américas-Chipre	Construcción de cinco pisos	1	14,6	2	Arena limosa café amarillenta con partículas de lapilli y grumos de óxido ferroso, semiplástica, húmeda y dura
							5	Arena limosa café amarillenta con partículas de lapilli y grumos de óxido ferroso, semiplástica, húmeda y dura
							8	Limo arenoso gris amarillento, plástico, muy húmedo y duro
							11,5	Arena limosa gris clara con partículas granulares y rocosas muy meteorizadas, plástica, húmeda y dura
					2	14	6	Limo arenoso café amarillento claro, plástico y duro
							9	Limo arenoso café amarillento, plástico, muy húmedo y duro
					3	13,8	3,1	Arena limosa café amarillenta con partículas de lapilli y grumos de óxido ferroso, semiplástica, húmeda y dura
							7	Arena limosa café amarillento clara, plástica y dura, con grumos ferrosos
							9,7	Limo arenoso gris amarillento, plástico, muy húmedo y duro
					4	12,2	2,3	Arena limosa café oscura, semiplástica, húmeda y dura
							8,2	Limo arenoso gris amarillento, plástico, húmedo y duro
43	mayo de 2015	Cra 22 #63-77	La Rambla	Ampliación de segunda planta - vivienda	1	6,2	4	Arena limosa café clara, semiplástica, húmeda y semidura
							5,8	Arena limosa gris, semiplástica, húmeda y semidura
					2	6	5	Arena limosa gris, semiplástica, muy húmeda y semidura
					3	6	3,5	Arena limosa café grisáceo, plástica, húmeda y dura
44	julio de 2015	Cll 51 #19-121	La Argentina	Legalización de cuarto piso	1	15,2	3	Arena limosa café amarillenta con grumos de óxido ferroso, plástica, húmeda y semiblanda
45	agosto de 2014	Cra 34E #48A-28	Bajo Prado	Construcción de vivienda de dos pisos	2	6	5,1	Limo rojizo con vetas blancas, muy plástico, húmedo y duro
					3	6	2	Limo arenoso café amarillento claro, plástico, húmedo y duro. Suelo natural.
46	marzo de 2015	Cra 26A Cll 41 bis	Vélez	Construcción de vivienda bifamiliar	1	8,2	2	Arena limosa café oscura, semiplástica, húmeda y blanda. Suelo natural.
					2	6,2	1,5	Arena limosa café oscura, semiplástica, húmeda y blanda. Suelo natural.
					3	5,3	2,5	Arena limosa café amarillenta, plástica, húmeda y blanda
47	octubre de 2013	Sector de expoferias	Expoferias	Remodelación de expoferias	2	1,4	1,2	Arena limosa gris clara, semihúmeda, plástica y blanda
48	junio de 2015	Cra 16 #4B-70	La Francia	Vivienda multifamiliar	1	6,1	2	Limo arenoso café amarillento con vetas de lapilli suelta, semiplástico, húmedo y semiduro. Suelo natural.
							3	Limo arenoso habano con vetas café amarillentas, plástico, húmedo y duro
					2	6,3	1,6	Arena limosa café amarillenta con vetas de lapilli suelta, semiplástica, húmeda y semidura. Suelo natural.
							4	Limo arenoso habano con vetas café amarillentas, plástico, húmedo y duro
					3	6,3	4,5	Limo arenoso habano con vetas café amarillentas, plástico, húmedo y duro
49	abril de 2014	Cll 12 Cra 7C	Chipre	Edificio Opalo	1	15,2	3	Limo arenoso gris claro, plástico, húmedo y semiblando
							9	Limo gris claro con vetas blancas y amarillo claras, muy plástico, húmedo y semiduro
							12	Limo arcilloso café claro, muy plástico, húmedo y semiduro

						15	Limo arenoso café grisáceo, muy plástico, húmedo y duro	
				2	15,2	3	Limo amarillento, plástico, húmedo y blando	
						6	Limo arenoso café claro con vetas amarillo claras, muy plástico, muy húmedo y semiduro	
						12	Limo arcilloso gris claro con vetas amarillo claras, muy plástico, húmedo y duro	
						15	Limo arenoso gris claro, muy plástico, húmedo y duro	
				3	10,5	2,5	Limo arenoso café grisáceo, plástico, húmedo y blando	
						5	Arena limosa café grisácea clara, plástica y sembrada	
						10	Limo arenoso café grisáceo claro, plástico, hu	
				4	15,2	3	Limo arenoso gris claro, plástico, húmedo y semiduro	
						6	Limo arenoso café grisáceo claro, plástico y semiduro	
						9	Limo arenoso café grisáceo claro, plástico, húmedo y duro	
						12	Limo arenoso gris claro, muy plástico, húmedo y duro	
						15	Limo café grisáceo, muy plástico, húmedo y duro	
				5	15,2	3	Arena limosa gris, húmeda y sembrada	
						6	Arena limosa gris café, plástica, muy húmeda y blanda	
						12	Limo arcilloso amarillo claro, muy plástico, húmedo y duro	
						15	Arena limosa gris clara, muy plástica, húmeda y dura	
50	mayo de 2015	CII 66 #23B-174	Palermo	Edificio Instituto Oftalmológico de Caldas	1	25	3	Limo arenoso gris habano, plástico, húmedo y blando
							9	Limo arenoso habano oscuro, plástico, húmedo y muy duro
							13	Limo arenoso amarillo encendido, plástico y semiduro
				2	15,5	6	Limo arenoso habano con vetas café amarillentas y rojizas, plástico, húmedo y duro. Suelo natural	
						9	Limo arenoso café amarillento claro con vetas y concreciones ferrosas, plástico, húmedo y duro	
						15	Limo arenoso gris claro con vetas blancas y grumos muy duros, plástico y húmedo	
				3	25,2	7	Limo arenoso café amarillento con vetas rojizas y grumos ferrosos, plástico, húmedo y duro	
				4	18,5	6	Limo arenoso gris amarillento con vetas rojizas, plástico, húmedo y duro	
						9	Limo arenoso café amarillento, plástico, húmedo y duro	
51	marzo de 2014	CII 45 #21-31	Sáenz	Legalización de depósito de agua	1	6	1,5	Arena limosa amarillo encendida, húmeda y sembrada
							5,5	Limo arenoso amarillo claro con vetas grises, plástico y semiduro
				2	6	1,5	Limo arenoso amarillento, húmedo, plástico y semiduro	
						4,5	Limo arenoso amarillo con pintas rojizas, plástico y duro	
52	julio de 2013	CII 39N Cra 18A	Parque Castilla	Construcción de cuatro pisos	2	4,6	2	Arena limosa vetada café amarillenta y café muy pálida, plástica, húmeda y dura. Suelo natural.
				3	5,2	2	Arena limosa café amarillenta, plástica, húmeda y dura	
				4	6,5	2	Limo arenoso vetado café violáceo, amarillo pálido y café muy pálido, plástico, húmedo y duro	
53	junio de 2014	Cra 22 #24-25	Centro	Construcción de local comercial, sótano y primer piso	2	6	4,4	Arena limosa gris, semiplástica, húmeda y dura
54	diciembre de 2013	Cra 23 #74-16	Milán	Edificio de apartamentos	1	15,2	6	Limo amarillento encendido, plástico, húmedo y duro
						9	Limo arenoso amarillo encendido con vetas y concreciones ferrosas, plástico, húmedo y duro	
				2	15,2	3	Arena limosa café amarillenta, semiplástica, húmeda y blanda	
						9,5	Limo arenoso amarillo encendido, plástico, húmedo y blando	
				3	15,2	3	Arena limosa café amarillenta, semiplástica y blanda	
						6	Limo arenoso café amarillento, plástico, húmedo y blando	
						12	Limo amarillento encendido, plástico, húmedo y duro	
				4	15,2	3	Arena limosa café amarillenta, semiplástica y blanda	
						9	Limo arenoso amarillo claro, plástico, húmedo y duro	
55	junio de 2014	CII 11 #8-22	Chipre	Ampliación de vivienda	1	6,2	6	Limo arenoso gris, plástico, húmedo y duro
				2	6	2,2	Arena limosa amarilla con lapilli, húmeda y sembrada	
						4	Arena limosa café amarillenta, plástica, húmeda y dura	
56	octubre de 2020	CII 37 #32A-45	Villa Carmenza	Ampliación de vivienda de categoría baja	2	5	2,4	Suelo arenoso de color pardo amarillento con cuarzo, micas y pómez, asociado a depósito piroclástico de tamaño lapilli
57	abril de 2019	CII 51 #37-11	El Guamal	Reconocimiento de vivienda	1	5	1,5	Limo arenoso de color amarillo oscuro, con fragmentos de cuarzo y biotita, resistencia baja a media, humedad alta
58	agosto de 2020	CII 51B #16A-13	La Asunción	Ampliación de vivienda de categoría baja	1	5,5	1,5	Arena limosa de color pardo anaranjado, con humedad alta y plasticidad media
59	junio de 2020	Diagonal 60D Transversal 10A-18	La Cumbre	Ampliación de vivienda	1	3,8	1,5	Limo arenoso color amarillo claro con habano, humedad baja
60	agosto de 2020	Manzana C, casa 17	Fátima	Construcción de vivienda	1	12	2,3	Limo arenoso color café amarillento con humedad media y resistencia baja
							3,1	Limo arenoso color amarillo con humedad media a alta y resistencia media
							4,3	Limo arenoso de color amarillo grisáceo con humedad media
							6	Limo arenoso de color amarillo de humedad media
61	marzo de 2018	Cra 20 #18-25	Los Agustinos	Edificación de cuatro pisos	3	-	6	Limos arenosos de color pardo amarillento
62	junio de 2019	Cra 22 CII 64	La Rambla	Edificación de categoría media	2	15	2,5	Ceniza amarillento pardo oscuro arenolimoso, resistencia media y humedad media
63	noviembre de 2019	Cra 21B #55B-35	Baja Leonora	Edificación de categoría alta	2	-	2	Material limo arcilloso de color amarillo claro, resistencia media y humedad media
64	marzo de 2018	Cra 23 #72-118	Milán	Bar Kretta	1	-	5	Depósito de caída piroclástica, color pardo amarillento, arena limosa, de consistencia media y humedad media
				2	-	3	Depósito de caída piroclástica, color pardo amarillento, arena limosa, de consistencia media y humedad media	
				3	-	3,8	Depósito de caída piroclástica, color pardo amarillento, arena limosa, de consistencia media y humedad media	
65	agosto de 2018	Lote 89	Cerros de la Alhambra	Construcción de vivienda unifamiliar	1	-	5	Depósito de caída piroclástica, limo arenoso, de resistencia media a alta, capas de lapilli y mantos de arena, color pardo oscuro, gris pardo amarillento y pardo
				2	-	3	Depósito de caída piroclástica, limo arenoso, de resistencia media a alta, capas de lapilli y mantos de arena, color pardo oscuro, gris pardo amarillento y pardo	
				3	-	3,8	Depósito de caída piroclástica, limo arenoso, de resistencia media a alta, capas de lapilli y mantos de arena, color pardo oscuro, gris pardo amarillento y pardo	
				4	-	3,5	Depósito de caída piroclástica, limo arenoso, de resistencia media a alta, capas de lapilli y mantos de arena, color pardo oscuro, gris pardo amarillento y pardo	
66	octubre de 2019	Casa 66	Cerros de la Alhambra	Edificación de categoría baja	1	-	5	Depósitos de caída piroclástica formados por intercalaciones de limos arenosos y limos arcillosos.
				2	-	2,5	Depósitos de caída piroclástica formados por intercalaciones de limos arenosos y limos arcillosos.	
				3	-	3	Depósitos de caída piroclástica formados por intercalaciones de limos arenosos y limos arcillosos.	
67	noviembre de 2013	CII 37 #23-54	Fundadores	Remodelación de edificación	1	-	6	Depósitos de lluvia piroclástica, formados por intercalaciones de limos arenosos y limos arcillosos.
				2	-	4	Depósitos de lluvia piroclástica, formados por intercalaciones de limos arenosos y limos arcillosos.	
				3	-	2	Depósitos de lluvia piroclástica, formados por intercalaciones de limos arenosos y limos arcillosos.	
68	febrero de 2018	Cra 23 #45-48	Av. Santander	Edificación de categoría baja	1	-	5	Depósitos de caída piroclástica, de color gris oscuro y amarillo, resistencia media y humedad media
				2	-	4,2	Depósitos de caída piroclástica, de color gris oscuro y amarillo, resistencia media y humedad media	
				3	-	3,5	Depósitos de caída piroclástica, de color gris oscuro y amarillo, resistencia media y humedad media	

## **Anexo 2 – Resultados de laboratorio**

Se extraen los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio y campo de las 293 muestras evaluadas dentro de los 68 estudios de suelos consultados. La tabla indica la profundidad a la que fue tomada la muestra, la presencia de N.A.F., el número de golpes SPT, la humedad natural, los Límites de Atterberg, el porcentaje que pasa el tamiz No.200, la clasificación SUCS, los pesos unitarios húmedo y seco, y la carga última del ensayo de resistencia a la compresión inconfiada.

# Barrio/Sector	# Muestra	Prof (m)	N.A.F.	Golpes SPT	Wn(%)	LL(%)	LP(%)	IP(%)	PT200(%)	ClasificaciónSUCS	Puh (g/cm <sup>3</sup> )	Pus (g/cm <sup>3</sup> )	Qu(Ton/m <sup>2</sup> )
1 Alta Suiza	1	5	no	24	61,4	82,5	49,7	32,9	81,1	MH	1,665	1,032	16,3
	2	1,5	no	17	43,8	56,6	45,8	10,8	55,4	MH	1,723	1,198	8,1
	3	4	no	22	72,7	90,6	57,3	33,3	78,4	MH	1,521	0,881	19,2
	4	7,5	si	28	85,4	107,6	72,7	34,9	77,7	MH	1,473	0,794	14,9
	5	4,5	no	23	95,0	118,0	87,8	30,2	63,0	MH	1,420	0,728	12,7
	6	8	si	32	93,9	115,9	81,1	34,8	92,6	MH	1,488	0,767	15,0
	7	8	si	24	77,7	98,8	69,1	29,7	88,8	MH	1,553	0,874	7,9
	8	1,5	no	17	45,4	64,6	37,9	26,7	67,2	MH	1,631	1,121	6,0
	9	3,5	si	20	62,1	79,7	69,6	10,1	85,1	MH	1,653	1,019	16,5
2 Chipre	10	5	no	38	62,1	91,1	48,2	42,9	86,1	MH	1,625	1,002	28,9
	11	5	no	33	111,8	143,2	91,9	51,3	92,1	MH	1,364	0,644	21,4
	12	14	si	40	100,7	119,2	72,6	46,6	80,6	MH	1,502	0,748	10,9
	13	5	no	30	138,3	160,2	100,8	59,4	93,6	MH	1,315	0,552	8,6
	14	9	si	36	70,1	87,6	50,8	36,7	65,2	MH	1,585	0,932	13,2
	15	14	si	53	110,5	125,3	81,3	44,0	81,9	MH	1,434	0,681	7,4
	16	9	no	31	72,9	87,3	55,6	31,6	86,2	MH	1,685	0,975	9,0
	17	14	si	40	87,4	100,9	69,1	31,7	75,8	MH	1,494	0,797	6,4
3 Chipre	18	4	si	8	51,3	56,0	47,5	8,5	35,5	SM	1,775	1,173	5,0
	19	4,8	si	19	85,8	110,1	77,3	32,8	74,5	MH	1,465	0,789	4,9
4 Las Delicias	20	1,5	no	21	111,7	122,7	88,2	34,5	82,9	MH	1,426	0,674	9,4
	21	7	si	41	56,2	68,7	46,9	21,7	82,0	MH	1,721	1,102	10,4
5 El Sol	22	8	si	40	51,6	55,7	51,5	4,2	47,9	SM	1,870	1,233	3,5
6 San Rafael	23	2	no	28	62,3	79,6	64,0	15,6	73,9	MH	1,591	0,980	7,3
	24	7	no	35	177,6	202,9	161,8	41,1	89,2	MH	1,325	0,477	11,4
7 Conjunto Cerrado Valles de la Alhambra	25	4,5	si	26	38,5	36,6	29,8	6,8	38,0	SM	1,692	1,222	0,7
8 Villanueva	26	4	no	40	61,3	78,1	53,7	24,4	78,9	MH	1,636	1,014	19,5
	27	3	no	32	46,4	61,9	38,3	23,6	56,2	MH	1,631	1,114	10,6
	28	7	no	37	57,3	72,2	54,1	18,1	58,3	MH	1,680	1,068	11,9
	29	9	no	28	85,3	101,5	76,9	24,5	74,7	MH	1,385	0,748	2,1
	30	13	no	21	54,9	73,0	53,4	19,6	72,9	MH	1,726	1,114	4,5
	31	8	no	25	58,2	74,8	61,1	13,7	79,1	MH	1,547	0,978	8,3
9 Colombia	32	1,5	no	20	57,4	63,6	52,9	10,7	66,7	MH	1,732	1,100	6,5
	33	1,5	no	27	56,8	65,4	55,0	10,4	62,2	MH	1,697	1,082	7,6
	34	4,5	no	40	59,2	64,7	56,0	8,6	68,9	MH	1,694	1,064	6,6
	35	1,5	no	30	59,2	67,1	54,9	12,2	67,7	MH	1,716	1,078	6,5
10 Centro	36	11	si	38	44,9	49,3	39,4	9,9	35,7	SM	1,900	1,311	7,9
	37	4	si	35	47,6	53,4	45,3	8,1	36,7	SM	1,986	1,346	7,3
	38	13	si	29	52,4	64,0	46,1	17,9	43,4	SM	1,889	1,239	6,7
	39	16	si	32	90,1	106,6	65,4	41,2	68,9	MH	1,831	0,963	6,4
	40	12	si	29	71,7	87,8	53,8	34,0	67,4	MH	1,850	1,078	7,7
	41	14	si	32	57,0	72,4	50,4	22,0	92,0	MH	1,876	1,195	6,2
11 Campoamor	42	2	no	28	83,2	110,9	88,3	22,6	54,2	MH	1,495	0,816	8,9
	43	2,5	si	24	65,6	81,8	69,9	11,9	74,7	MH	1,651	0,997	6,0
	44	1,5	no	22	60,0	77,1	60,9	16,2	84,5	MH	1,654	1,034	9,1
12 Alta Suiza	45	4,5	si	25	45,6	60,2	48,6	11,6	79,4	MH	1,800	1,236	7,8
13 Palermo	46	3,5	si	23	63,0	79,5	65,2	14,3	63,3	MH	1,719	1,055	6,7

	47	7	si	27	59,1	75,3	57,7	17,6	78,9	MH	1,592	1,001	6,7
	48	6,5	si	25	62,8	76,1	62,9	13,3	86,7	MH	1,624	0,997	6,8
	49	3	si	33	51,4	70,0	55,1	14,9	90,6	MH	1,673	1,105	21,1
	50	7,5	si	28	56,4	70,5	52,1	18,4	79,6	MH	1,686	1,078	9,2
	51	3	no	26	59,9	71,0	54,7	16,2	85,6	MH	1,693	1,058	8,0
	52	5	si	30	62,6	83,3	64,1	19,2	55,1	MH	1,657	1,019	6,9
	53	4,5	si	31	62,0	81,1	70,2	10,9	60,4	MH	1,788	1,104	10,4
14 Alta Suiza	54	4	no	27	47,7	58,2	47,3	10,9	39,4	SM	1,661	1,124	11,9
	55	8	no	36	27,2	36,9	32,7	4,2	46,7	SM	1,747	1,374	11,1
	56	4,5	no	30	72,6	87,3	72,0	15,4	62,1	MH	1,575	0,912	8,4
	57	8	no	25	121,0	147,5	95,5	52,0	76,9	MH	1,371	0,621	7,4
	58	8	no	26	120,0	140,0	102,1	37,9	91,2	MH	1,322	0,601	11,6
	59	4	no	26	51,5	59,2	50,4	8,8	38,7	SM	1,690	1,115	6,5
	60	8	no	26	104,9	130,5	91,0	39,4	71,0	MH	1,413	0,690	12,7
15 La Asunción	61	4	si	15	37,9	45,1	40,2	4,9	41,7	SM	1,690	1,226	9,6
	62	5	no	19	38,2	52,7	43,2	9,5	56,1	MH	1,374	0,994	3,5
	63	9	si	25	69,9	83,4	60,0	23,4	95,0	MH	1,582	0,931	8,8
	64	11	si	15	51,0	64,1	52,2	11,9	83,5	MH	1,612	1,068	5,5
16 Bavaria	65	4	no	30	51,6	66,5	57,2	9,3	41,1	SM	1,686	1,112	7,5
	66	12	si	30	80,2	94,9	74,0	21,0	52,1	MH	1,632	0,905	10,4
	67	16	si	50	56,7	71,6	56,6	14,9	80,2	MH	1,687	1,077	8,6
	68	20	si	60	96,4	120,5	84,9	35,6	68,4	MH	1,469	0,748	10,2
	69	7	no	27	72,6	84,7	75,4	9,4	47,8	SM	1,619	0,938	5,8
	70	10,5	si	40	64,7	79,1	55,1	24,0	75,7	MH	1,692	1,027	8,4
	71	14	si	40	68,9	83,7	60,4	23,4	84,2	MH	1,632	0,966	10,0
	72	4	no	18	34,9	44,1	38,7	5,3	40,2	SM	1,681	1,246	5,7
	73	8	no	39	59,5	79,1	52,0	27,2	82,2	MH	1,740	1,091	15,5
	74	12	no	39	72,1	88,1	56,7	31,4	67,3	MH	1,509	0,877	9,1
	75	20	si	60	116,6	133,9	95,4	38,5	80,6	MH	1,472	0,680	9,5
	76	3,5	no	26	43,4	51,4	43,8	7,6	38,1	SM	1,708	1,191	8,2
17 Camilo Torres	77	2	no	29	39,1	46,6	38,7	7,9	36,4	SM	1,760	1,266	4,5
	78	1,5	no	25	32,9	43,1	38,8	4,3	33,9	SM	1,771	1,332	5,9
	79	4	no	34	61,0	78,5	58,0	20,5	68,5	MH	1,553	0,964	8,3
	80	1,5	no	24	38,1	48,6	40,5	8,1	38,2	SM	1,715	1,242	3,6
	81	5	no	31	40,0	51,6	42,2	9,4	34,1	SM	1,761	1,258	7,6
18 Av. Santander**	82	4	no	33	34,9	52,4	43,3	9,2	61,6	MH	1,722	1,276	7,7
	83	1,5	no	35	43,9	62,3	52,1	10,2	56,6	MH	1,621	1,126	13,7
	84	3	no	24	56,1	65,4	52,2	13,2	69,6	MH	1,621	1,039	8,1
19 Las Américas	85	4	no	30	100,3	120,0	65,0	55,0	85,9	MH	1,386	0,692	12,1
	86	7	no	40	153,8	174,4	122,6	51,7	77,3	MH	1,301	0,512	15,7
	87	4	no	30	155,9	180,1	129,3	50,8	80,6	MH	1,315	0,514	8,2
20 Av. Santander**	88	5	no	30	36,9	39,4	36,0	3,5	34,9	SM	1,840	1,344	11,3
	89	4,5	no	25	39,8	46,6	41,2	5,4	36,0	SM	1,749	1,251	11,5
	90	1,5	no	15	41,0	54,8	44,5	10,3	53,3	MH	1,654	1,173	6,8
	91	4,5	no	31	38,6	51,5	41,0	10,6	41,2	SM	1,902	1,372	9,2
21 San Jorge	92	1,6	no	15	47,7	55,0	50,1	4,9	38,7	SM	1,617	1,094	6,0
	93	1,5	no	18	65,2	83,0	64,0	19,0	71,2	MH	1,699	1,029	6,1
	94	1,5	no	21	63,0	77,7	62,1	15,6	65,3	MH	1,679	0,974	8,2

22 San Jorge (Detrás del colegio Los Ángeles)	95	4,7	no	16	51,8	60,4	55,2	5,2	43,7	SM	1,618	1,066	11,8
	96	10,5	si	30	56,3	69,2	59,7	9,5	53,9	MH	1,643	1,051	7,3
	97	12	si	45	139,1	170,3	128,1	42,2	80,4	MH	1,633	0,683	10,3
	98	7	no	28	60,4	71,5	48,9	22,6	60,3	MH	1,569	0,978	8,7
	99	11	no	30	92,1	124,5	85,6	38,9	71,4	MH	1,453	0,756	11,9
	100	13	no	32	145,4	172,4	134,2	38,1	74,2	MH	1,280	0,522	17,4
	101	6	no	36	95,9	129,7	88,6	41,1	80,7	MH	1,468	0,749	24,5
	102	8	no	52	143,4	179,6	134,6	44,9	91,1	MH	1,308	0,537	25,6
	103	10	no	42	149,6	174,5	127,5	47,0	87,2	MH	1,304	0,523	11,7
	104	12,2	si	38	55,2	74,0	42,2	31,8	73,6	MH	1,703	1,097	19,5
23 Sector de Los Agustinos	105	5	si	35	41,2	61,4	44,5	16,9	66,2	MH	1,833	1,298	19,3
	106	5	no	31	105,4	123,8	96,4	27,4	80,5	MH	1,475	0,718	12,0
	107	6	si	28	58,3	74,5	49,4	25,1	83,5	MH	1,771	1,119	11,9
	108	6	si	27	44,1	70,2	43,5	26,6	90,5	MH	1,892	1,313	27,7
	109	7	si	40	58,7	77,9	55,7	22,2	74,2	MH	1,682	1,060	12,1
24 Centro	110	9	no	29	83,5	98,5	69,7	28,8	73,0	MH	1,540	0,839	12,3
	111	15	si	35	75,9	88,1	57,6	30,5	71,9	MH	1,504	0,855	23,5
	112	18	si	38	97,3	110,2	72,7	37,5	77,6	MH	1,456	0,738	13,5
	113	6	no	26	107,8	120,1	97,6	22,5	51,1	MH	1,349	0,649	13,8
	114	15	si	39	101,7	117,4	85,3	32,1	83,0	MH	1,397	0,693	14,6
	115	18	si	39	101,7	118,4	83,1	35,3	83,9	MH	1,428	0,708	16,0
	116	9	si	26	85,1	93,8	67,0	26,7	56,2	MH	1,515	0,819	12,2
	117	15	si	32	120,7	140,6	104,9	35,7	80,8	MH	1,388	0,629	11,3
	118	9	no	26	86,2	95,5	66,6	28,9	78,2	MH	1,472	0,790	16,2
	119	12	no	28	86,4	98,0	68,6	29,4	67,6	MH	1,530	0,820	19,2
	120	4	no	20	56,2	62,0	46,7	15,3	76,7	MH	1,682	1,077	23,5
	121	10	no	33	88,1	98,7	59,9	38,8	81,7	MH	1,526	0,811	13,5
	122	13	si	41	96,3	113,1	78,6	34,5	73,4	MH	1,485	0,756	10,7
25 Laureles	123	5	no	12	44,4	52,5	45,1	7,5	33,8	SM	1,693	1,172	10,3
	124	7	no	15	60,7	74,7	53,7	20,9	40,8	SM	1,562	0,972	10,9
	125	9	no	16	67,5	80,7	62,1	18,6	56,7	MH	1,591	0,950	9,2
	126	13	si	26	118,0	144,3	104,3	40,1	92,0	MH	1,591	0,730	7,4
	127	10	no	16	68,0	81,2	56,7	24,5	65,0	MH	1,582	0,942	9,8
	128	12	no	20	78,5	90,3	64,4	25,9	81,7	MH	1,321	0,740	12,4
	129	14	si	26	110,5	146,8	113,0	33,8	96,1	MH	1,331	0,633	6,5
	130	15	si	38	139,6	159,3	115,2	44,1	87,1	MH	1,408	0,588	18,0
	131	6	no	10	46,0	55,4	41,7	13,7	43,1	SM	1,621	1,110	7,3
	132	15	si	63	95,3	105,0	66,9	38,1	39,3	SM	1,704	0,873	18,8
	133	13	si	37	127,3	156,8	117,9	38,9	90,4	MH	1,315	0,579	10,8
134	16	si	46	46,5	63,8	42,7	21,2	76,5	MH	1,927	1,315	38,1	
26 La Palma	135	7	no	40	73,0	85,0	68,0	17,0	62,8	MH	1,637	0,946	23,8
	136	7	si	28	61,5	76,6	58,6	18,0	36,8	SM	1,684	1,043	12,7
	137	7	si	43	36,5	58,3	38,4	19,9	78,1	MH	1,823	1,336	16,9
27 Marmato	138	1,5	no	18	59,8	65,5	53,3	12,2	56,3	MH	1,682	1,053	6,1
28 Sector de Tejares	139	8	no	21	41,3	50,8	45,7	5,1	38,4	SM	1,853	1,311	6,4
	140	5,5	no	20	28,2	34,2	29,9	4,4	34,1	SM	1,880	1,466	6,9
	141	7,5	no	12	40,0	53,5	39,3	14,2	74,0	MH	1,803	1,287	7,2
29 Alta Suiza	142	7,5	no	31	72,1	93,5	70,0	23,5	73,8	MH	1,669	0,970	8,5

	143	12,5	si	30	106,6	133,5	99,5	34,0	70,2	MH	1,448	0,701	7,4
	144	7	si	30	80,3	115,6	86,0	29,6	59,8	MH	1,668	0,925	9,4
30 Sáenz	145	6	no	28	52,2	67,2	50,4	16,8	60,6	MH	1,758	1,155	14,5
	146	10	no	34	80,8	103,2	60,6	42,6	96,1	MH	1,673	0,926	12,6
31 El Palmar	147	1,5	no	30	42,7	57,2	46,0	11,2	59,2	MH	1,820	1,276	10,9
32 Palermo	148	4	no	20	31,8	39,2	32,2	7,0	45,7	SM	1,763	1,338	5,0
	149	7	no	48	68,3	74,2	59,6	14,6	56,6	MH	1,526	0,907	8,5
	150	10	si	36	51,4	63,4	50,0	13,3	76,5	MH	1,535	1,014	4,4
	151	10	si	44	82,4	103,1	68,2	34,9	67,8	MH	1,507	0,826	11,2
	152	10	no	48	105,0	128,4	88,6	39,9	74,2	MH	1,575	0,768	7,8
	153	10	no	31	90,7	118,1	77,6	40,5	83,5	MH	1,398	0,733	12,9
33 Chipre	154	1,5	no	17	87,0	91,8	81,4	10,4	38,9	SM	1,578	0,844	10,9
	155	5	no	20	66,2	79,6	59,7	19,8	63,4	MH	1,569	0,944	8,4
	156	1,5	no	17	43,3	52,4	43,0	9,4	42,2	SM	1,763	1,230	11,6
	157	4	no	22	62,6	74,3	54,9	19,4	70,2	MH	1,550	0,953	11,0
	158	1,5	no	22	36,8	43,6	37,2	6,5	38,0	SM	1,785	1,305	13,5
	159	3	no	18	46,6	56,3	42,0	14,3	47,6	SM	1,557	1,063	8,8
34 Av. Santander	160	14	si	35	52,8	65,2	39,4	25,8	78,7	MH	1,786	1,168	14,6
	161	11	no	28	125,1	151,4	112,2	39,2	67,5	MH	1,301	0,578	19,5
	162	14	si	42	92,8	139,9	101,3	38,5	62,2	MH	1,520	0,788	5,9
	163	11	no	25	124,6	148,0	108,7	39,4	75,7	MH	1,279	0,570	11,1
	164	12	no	36	101,4	140,0	111,5	28,5	72,4	MH	1,309	0,650	13,8
	165	15,5	no	33	119,5	155,5	120,8	34,7	68,3	MH	1,418	0,646	10,6
	166	8	no	52	143,4	179,6	134,6	44,9	91,1	MH	1,308	0,537	25,6
	167	10	no	42	149,6	174,5	127,5	47,0	87,2	MH	1,304	0,523	11,7
35 El Caribe	168	1	no	8	38,4	45,1	37,9	7,2	41,7	SM	1,675	1,210	5,2
	169	1,2	no	14	50,4	62,4	50,9	11,5	58,0	MH	1,651	1,098	10,8
	170	4	no	21	61,1	74,0	54,6	19,5	54,2	MH	1,583	0,982	7,6
	171	1	no	13	53,7	62,6	47,9	14,7	43,2	SM	1,599	1,040	7,0
	172	3	no	17	51,8	63,9	45,4	18,5	61,8	MH	1,649	1,087	8,4
36 Fátima	173	6	no	25	84,5	116,0	79,7	36,2	56,9	MH	1,368	0,742	9,9
	174	1,5	no	20	80,0	102,5	70,9	31,6	63,5	MH	1,437	0,798	9,1
	175	5	no	25	58,2	71,7	45,5	26,2	69,9	MH	1,746	1,104	9,3
	176	3	no	21	58,8	77,3	52,0	25,3	80,2	MH	1,474	0,929	8,4
	177	8	no	32	104,3	122,5	84,1	38,4	82,8	MH	1,480	0,724	12,9
	178	10	no	24	87,9	95,5	71,4	24,1	70,1	MH	1,423	0,757	13,9
	179	5	no	26	41,3	51,7	42,2	9,6	46,2	SM	1,685	1,193	14,4
37 Versalles	180	7,5	si	10	110,5	55,0	44,0	11,0	40,0	SM	1,700	0,806	12,0
38 Belén	181	12	no	-	33,7	39,2	32,1	8,1	34,3	SC	2,141	1,652	4,0
39 El Bosque	182	2	no	-	52,3	53,0	30,5	22,5	53,6	MH	1,782	1,170	5,3
	183	6	no	-	95,6	110,6	48,0	62,6	62,1	MH	1,194	0,610	6,9
	184	4	no	-	37,3	44,1	29,4	14,7	51,5	ML	1,901	1,385	10,4
40 La Francia	185	5	si	44	65,6	74,6	44,8	29,8	72,1	MH	1,878	1,153	2,2
	186	4	no	70	50,6	55,0	41,1	13,8	69,5	MH	1,856	1,249	8,2
41 Alta Suiza	187	1,5	no	31	57,8	67,7	51,0	16,7	54,0	MH	1,661	1,053	8,7
	188	6	no	22	75,0	94,1	50,7	43,4	51,1	MH	1,573	0,899	6,6
	189	2	no	22	63,0	73,8	50,9	22,9	64,6	MH	1,601	0,982	5,8
	190	5	no	40	48,5	68,5	38,2	30,3	51,3	MH	1,704	1,148	15,7

42 Américas-Chipre	191	2	no	31	35,4	43,9	35,4	8,5	35,4	SM	1,693	1,251	6,6
	192	5	no	30	37,2	45,2	36,7	8,5	34,3	SM	1,770	1,290	9,7
	193	8	si	35	74,3	95,5	65,9	29,6	77,6	MH	1,373	0,788	7,5
	194	11,5	si	31	44,8	58,0	41,7	16,3	47,5	SM	1,753	1,211	6,2
	195	6	no	30	54,5	75,8	51,2	24,5	57,4	MH	1,539	0,996	6,3
	196	9	si	52	102,7	125,2	79,7	45,5	93,8	MH	1,302	0,642	11,4
	197	3,1	no	28	39,5	51,2	37,8	13,4	48,5	SM	1,686	1,209	14,2
	198	7	no	55	40,6	49,4	35,0	14,4	48,3	SM	1,689	1,201	10,3
	199	9,7	no	50	65,2	90,2	48,1	42,2	79,2	MH	1,440	0,872	11,7
	200	2,3	no	26	38,7	48,6	38,9	9,7	42,3	SM	1,667	1,202	6,9
	201	8,2	no	42	43,2	57,9	38,2	19,7	60,1	MH	1,603	1,119	7,0
43 La Rambla	202	4	no	25	58,4	62,3	52,1	10,2	22,9	SM	1,668	1,053	4,4
	203	5,8	no	35	53,1	66,5	35,0	31,5	47,9	SM	1,627	1,062	7,2
	204	5	no	45	46,4	60,7	36,6	24,1	44,6	SM	1,676	1,145	8,8
	205	3,5	no	45	40,9	55,9	33,7	22,2	41,2	SM	1,678	1,191	5,4
44 La Argentina	206	3	no	63	98,0	108,6	73,0	35,6	48,6	SM	1,461	0,738	4,8
45 Bajo Prado	207	5,1	no	35	53,4	69,1	38,2	30,8	93,8	MH	1,717	1,120	16,9
	208	2	no	26	138,9	154,8	102,0	52,9	94,3	MH	1,134	0,475	8,9
46 Vélez	209	2	no	16	45,3	58,2	43,9	14,3	40,5	SM	1,655	1,139	5,1
	210	1,5	no	25	42,3	51,3	41,5	9,8	35,9	SM	1,748	1,229	5,4
	211	2,5	no	21	50,6	59,0	44,8	14,1	38,1	SM	1,674	1,111	5,1
47 Expoferias	212	1,2	no	62	25,6	93,5	69,4	24,1	49,6	SM	1,882	1,498	3,1
48 La Francia	213	2	no	27	47,7	57,2	42,9	14,3	51,7	MH	1,705	1,155	6,7
	214	3	no	35	103,0	119,5	59,5	60,0	86,0	MH	1,438	0,708	8,1
	215	1,6	no	25	57,8	68,4	51,8	16,6	38,1	SM	1,540	0,976	7,7
	216	4	no	30	57,4	72,9	54,3	18,6	72,8	MH	1,667	1,059	7,4
	217	4,5	no	40	84,2	103,8	68,2	35,6	82,2	MH	1,531	0,831	8,1
49 Chipre	218	3	no	22	51,2	63,6	40,1	23,6	66,6	MH	1,721	1,138	9,0
	219	9	no	26	58,2	75,9	40,1	35,7	92,0	MH	1,816	1,148	17,7
	220	12	si	42	56,8	71,9	39,1	32,7	96,4	MH	1,587	1,012	10,0
	221	15	si	36	80,1	98,0	49,7	48,3	83,6	MH	1,388	0,771	14,1
	222	3	no	21	39,9	52,3	36,9	15,4	96,7	MH	1,701	1,216	7,1
	223	6	no	26	71,4	92,6	45,5	47,2	81,1	MH	1,375	0,802	6,0
	224	12	si	37	123,1	142,4	101,5	40,9	91,2	MH	1,379	0,618	11,2
	225	15	si	41	62,0	79,1	42,1	37,0	82,1	MH	1,681	1,038	29,5
	226	2,5	no	18	62,7	77,2	46,8	30,4	54,2	MH	1,673	1,029	6,5
	227	5	no	27	52,5	63,1	37,2	25,9	32,3	SM	1,759	1,153	8,7
	228	10	si	38	116,6	133,4	70,6	62,8	77,6	MH	1,434	0,662	13,9
	229	3	no	24	56,9	70,7	39,0	31,7	52,2	MH	1,623	1,034	8,1
	230	6	no	14	68,7	83,9	43,9	39,9	52,7	MH	1,471	0,872	11,4
	231	9	no	30	117,2	134,4	68,2	66,2	76,7	MH	1,498	0,690	14,7
	232	12	no	45	91,7	110,2	57,1	53,1	73,3	MH	1,440	0,751	13,3
233	15	si	41	92,3	116,2	58,7	57,5	90,2	MH	1,449	0,753	9,9	
234	3	no	24	33,3	41,9	38,1	3,8	23,2	SM	1,871	1,404	5,2	
235	6	no	34	52,4	63,2	52,8	10,4	34,3	SM	1,682	1,104	7,0	
236	12	si	32	69,5	89,8	46,9	42,8	89,9	MH	1,615	0,953	10,1	
237	15	si	50	56,8	68,7	43,7	25,0	42,0	SM	1,728	1,102	10,7	
50 Palermo	238	3	no	31	106,6	128,8	70,2	58,6	81,8	MH	1,344	0,651	12,5

	239	9	si	76	113,4	130,3	71,8	58,5	86,3	MH	1,339	0,627	11,6
	240	13	si	60	66,1	79,1	41,8	37,4	82,9	MH	1,691	1,018	6,4
	241	6	no	46	142,9	162,3	91,5	70,9	73,0	MH	1,302	0,536	9,6
	242	9	si	48	152,6	174,3	101,4	72,9	83,6	MH	1,330	0,527	12,2
	243	15	si	67	59,0	72,2	40,2	31,9	89,1	MH	1,560	0,981	12,4
	244	7	no	65	122,7	148,4	71,6	76,8	84,3	MH	1,367	0,614	19,1
	245	6	no	31	66,8	73,7	53,8	20,0	56,1	MH	1,634	0,980	7,3
	246	9	si	80	108,6	127,8	64,0	63,8	89,2	MH	1,314	0,630	13,1
51 Sáenz	247	1,5	no	18	41,6	49,9	38,7	11,2	47,3	SM	1,760	1,243	5,9
	248	5,5	no	25	52,0	63,9	48,1	15,8	60,9	MH	1,762	1,159	9,2
	249	1,5	no	18	55,0	69,7	46,0	23,7	61,8	MH	1,737	1,121	9,9
	250	4,5	no	31	49,9	67,0	45,7	21,2	65,7	MH	1,691	1,128	22,9
52 Parque Castilla	251	2	no	20	41,5	54,1	39,1	15,0	47,2	SM	1,640	1,159	9,0
	252	2	no	27	64,2	79,0	58,1	20,9	46,1	SM	1,695	1,033	9,1
	253	2	no	18	96,5	127,2	77,3	50,0	64,9	MH	1,423	0,724	6,7
53 Centro	254	4,4	no	25	46,4	49,6	43,3	6,3	34,2	SM	1,893	1,292	5,6
54 Milán	255	6	no	39	148,0	175,4	121,4	54,0	95,7	MH	1,257	0,507	12,2
	256	9	no	33	65,6	83,8	48,6	35,2	74,1	MH	1,536	0,928	8,5
	257	3	no	20	58,3	66,6	55,8	10,8	27,7	SM	1,597	1,008	7,5
	258	9,5	no	49	80,2	92,8	77,7	15,1	51,7	MH	1,582	0,878	6,3
	259	3	no	21	42,1	50,2	42,0	8,2	25,8	SM	1,738	1,223	6,1
	260	6	no	27	57,0	79,0	48,1	30,9	61,9	MH	1,593	1,014	6,1
	261	12	no	46	94,5	109,4	78,4	31,0	97,1	MH	1,295	0,666	9,2
	262	3	no	26	31,8	36,7	31,6	5,1	36,6	SM	1,717	1,303	4,4
	263	9	no	41	60,0	78,0	58,5	19,5	78,7	MH	1,387	0,867	10,6
55 Chipre	264	6	si	30	103,3	115,5	74,2	41,4	76,8	MH	1,454	0,715	5,0
	265	2,2	no	13	64,2	73,2	56,1	17,1	40,9	SM	1,411	0,859	4,3
	266	4	no	20	56,7	66,2	47,8	18,5	46,1	SM	1,706	1,089	7,5
56 Villa Carmenza	267	2,4	no	-	44,0	45,0	29,0	16,0	56,0	ML	1,762	1,224	5,1
57 El Guamal	268	1,5	no	-	55,9	63,2	34,1	29,1	51,9	MH	1,670	1,140	3,8
58 La Asunción	269	1,5	no	-	40,0	40,0	29,0	11,0	33,0	SC	1,559	1,113	4,8
59 La Cumbre	270	1,5	no	-	24,6	44,1	40,4	3,7	68,7	ML	2,020	1,700	17,1
60 Fátima	271	2,3	no	-	61,2	56,1	30,5	25,6	72,2	MH	1,558	0,985	11,0
	272	3,1	no	-	64,3	101,5	47,9	53,6	62,8	MH	1,363	0,830	5,6
	273	4,3	no	-	59,2	67,9	37,0	30,8	81,3	MH	1,658	0,917	10,2
	274	6	no	-	54,3	59,9	33,3	26,6	78,3	MH	1,684	1,138	3,6
61 Los Agustinos	275	6	si	-	47,7	53,4	43,2	10,2	27,0	SM	1,764	1,194	7,2
62 La Rambla	276	2,5	no	-	46,1	59,7	38,0	21,7	94,4	MH	1,549	1,060	1,7
63 Baja Leonora	277	2	no	-	43,3	65,0	42,9	22,2	83,0	MH	1,620	1,130	6,3
64 Milán	278	5	no	-	53,7	81,6	46,2	35,4	66,3	MH	1,580	1,030	10,8
	279	3	no	-	68,6	90,8	62,7	28,1	54,8	MH	1,540	0,910	11,3
	280	3,8	no	-	47,6	64,3	46,6	17,6	45,2	SM	1,660	1,120	10,7
65 Cerros de la Alhambra	281	5	no	-	36,1	42,1	34,0	8,1	36,1	SM	1,710	1,260	5,4
	282	3	no	-	33,8	39,3	32,5	6,8	33,0	SM	1,660	1,240	4,5
	283	3,8	no	-	34,9	39,8	32,7	7,1	36,0	SM	1,820	1,350	8,5
	284	3,5	no	-	26,2	38,2	31,0	7,2	40,6	SM	2,040	1,620	13,2
66 Cerros de la Alhambra	285	5	no	-	43,6	48,6	35,4	13,2	59,4	ML	1,710	1,190	8,5
	286	2,5	no	-	53,6	57,6	40,2	17,5	65,5	MH	1,690	1,100	4,6

	287	3	no	-	33,9	35,6	30,6	5,0	31,9	SM	1,720	1,280	3,1	
67 Fundadores	288	6	no	-	108,3	118,5	64,6	53,9	90,6	MH	1,457	0,697	9,1	
	289	4	no	-	103,4	131,6	69,1	62,5	89,9	MH	1,487	0,731	18,2	
	290	2	no	-	172,2	188,4	98,8	89,6	100,0	MH	1,287	0,473	11,2	
68 Av. Santander	291	5	no	-	57,7	75,6	43,9	31,7	84,4	MH	1,560	0,990	10,8	
	292	4,2	no	-	48,1	63,9	38,4	25,5	80,3	MH	1,590	1,740	13,6	
	293	3,5	no	-	62,3	85,7	49,6	36,1	89,6	MH	1,510	0,930	12,7	
	<b>Promedio</b>				<b>70,1</b>	<b>85,4</b>	<b>59,7</b>	<b>25,6</b>	<b>65,0</b>		<b>1,6</b>	<b>1,0</b>	<b>10,1</b>	
	<b>Mínimo</b>				<b>1,0</b>	<b>8</b>	<b>24,6</b>	<b>34,2</b>	<b>29,0</b>	<b>3,5</b>	<b>22,9</b>	<b>1,1</b>	<b>0,5</b>	<b>0,7</b>
	<b>Máximo</b>				<b>20,0</b>	<b>80</b>	<b>177,6</b>	<b>202,9</b>	<b>161,8</b>	<b>89,6</b>	<b>100,0</b>	<b>2,1</b>	<b>1,7</b>	<b>38,1</b>
	<b>Desviación estándar</b>				<b>30,4</b>	<b>35,3</b>	<b>23,9</b>	<b>15,7</b>	<b>19,0</b>		<b>0,2</b>	<b>0,2</b>	<b>5,1</b>	

### **Anexo 3 – Resultados para muestras entre 3 y 21 metros de profundidad**

En los literales A3-1 a A3-4, se presentan los datos y correlaciones obtenidas para las muestras procedentes de diferentes rangos de profundidad, a partir de tres metros y hasta 21 metros (la información pertinente al rango de profundidad de 0 a 3m, está inserta en el cuerpo del informe).

### A3-1 Muestras de tres a seis metros de profundidad

En este rango de profundidades, se concentra la mayor cantidad de muestras del estudio (96), y en la Tabla A3- 1 se resumen sus resultados para las variables a evaluar. El Límite Líquido promedio indica un predominio de suelos con alta compresibilidad, ya que es superior a 50% (76%), y su Índice de Plasticidad promedio permite correlacionar las muestras a una plasticidad baja (23%). Por su parte, la resistencia última del ensayo de compresión inconfiada, exhibe un promedio de 101 KN/m<sup>2</sup>, correlacionable con una resistencia firme. Para este parámetro, las muestras oscilan en un rango amplio entre 7,1 KN/m<sup>2</sup> y 283,6 KN/m<sup>2</sup>, es decir, son de consistencia variable entre muy blanda y muy firme.

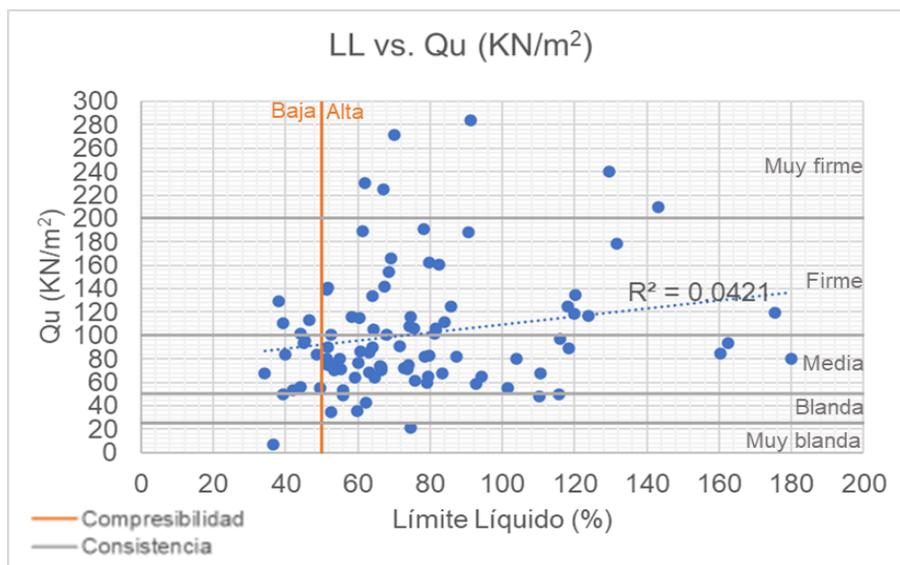
**Tabla A3- 1.** Límites de Atterberg y resistencia a la compresión inconfiada para muestras de tres a seis metros.

# Muestra	Prof. (m)	LL (%)	IP (%)	Qu (Ton/m <sup>2</sup> )	Qu (KN/m <sup>2</sup> )
1	5	82,5	32,9	16,3	160,2
3	4	90,6	33,3	19,2	188,6
5	4,5	118,0	30,2	12,7	124,6
9	3,5	79,7	10,1	16,5	162,1
10	5	91,1	42,9	28,9	283,6
11	5	143,2	51,3	21,4	210,0
13	5	160,2	59,4	8,6	84,2
18	4	56,0	8,5	5,0	49,1
19	4,8	110,1	32,8	4,9	48,0
25	4,5	36,6	6,8	0,7	7,1
26	4	78,1	24,4	19,5	190,7
34	4,5	64,7	8,6	6,6	64,4
37	4	53,4	8,1	7,3	71,5
45	4,5	60,2	11,6	7,8	76,9
46	3,5	79,5	14,3	6,7	65,3
52	5	83,3	19,2	6,9	67,6
53	4,5	81,1	10,9	10,4	101,5
54	4	58,2	10,9	11,9	116,3
56	4,5	87,3	15,4	8,4	82,1
59	4	59,2	8,8	6,5	64,0
61	4	45,1	4,9	9,6	93,9
62	5	52,7	9,5	3,5	34,4
65	4	66,5	9,3	7,5	73,3
72	4	44,1	5,3	5,7	55,8
76	3,5	51,4	7,6	8,2	80,1
79	4	78,5	20,5	8,3	81,6
81	5	51,6	9,4	7,6	74,7
82	4	52,4	9,2	7,7	75,3
85	4	120,0	55,0	12,1	118,5
87	4	180,1	50,8	8,2	80,5
88	5	39,4	3,5	11,3	110,7
89	4,5	46,6	5,4	11,5	112,8
91	4,5	51,5	10,6	9,2	89,8
95	4,7	60,4	5,2	11,8	115,3

# Muestra	Prof. (m)	LL (%)	IP (%)	Qu (Ton/m <sup>2</sup> )	Qu (KN/m <sup>2</sup> )
101	6	129,7	41,1	24,5	240,0
105	5	61,4	16,9	19,3	189,1
106	5	123,8	27,4	12,0	117,2
107	6	74,5	25,1	11,9	116,2
108	6	70,2	26,6	27,7	271,7
113	6	120,1	22,5	13,8	134,9
120	4	62,0	15,3	23,5	230,6
123	5	52,5	7,5	10,3	101,0
131	6	55,4	13,7	7,3	71,6
140	5,5	34,2	4,4	6,9	67,3
145	6	67,2	16,8	14,5	142,0
148	4	39,2	7,0	5,0	49,4
155	5	79,6	19,8	8,4	82,5
157	4	74,3	19,4	11,0	107,6
170	4	74,0	19,5	7,6	74,7
173	6	116,0	36,2	9,9	97,1
175	5	71,7	26,2	9,3	91,2
179	5	51,7	9,6	14,4	141,1
183	6	110,6	62,6	6,9	67,7
184	4	44,1	14,7	10,4	101,7
185	5	74,6	29,8	2,2	21,5
186	4	55,0	13,8	8,2	80,2
188	6	94,1	43,4	6,6	65,1
190	5	68,5	30,3	15,7	154,3
192	5	45,2	8,5	9,7	95,4
195	6	75,8	24,5	6,3	61,4
197	3,1	51,2	13,4	14,2	139,1
202	4	62,3	10,2	4,4	42,8
203	5,8	66,5	31,5	7,2	70,6
204	5	60,7	24,1	8,8	86,4
205	3,5	55,9	22,2	5,4	53,1
207	5,1	69,1	30,8	16,9	166,0
216	4	72,9	18,6	7,4	72,5
217	4,5	103,8	35,6	8,1	79,9
223	6	92,6	47,2	6,0	58,4
227	5	63,1	25,9	8,7	85,7
230	6	83,9	39,9	11,4	111,6
235	6	63,2	10,4	7,0	68,4
241	6	162,3	70,9	9,6	93,7
245	6	73,7	20,0	7,3	71,7
248	5,5	63,9	15,8	9,2	89,8
250	4,5	67,0	21,2	22,9	225,0
254	4,4	49,6	6,3	5,6	55,3
255	6	175,4	54,0	12,2	119,5
260	6	79,0	30,9	6,1	60,0
264	6	115,5	41,4	5,0	49,5
266	4	66,2	18,5	7,5	73,6
272	3,1	101,5	53,6	5,6	55,1
273	4,3	67,9	30,8	10,2	100,4
274	6	59,9	26,6	3,6	35,3
275	6	53,4	10,2	7,2	70,2
278	5	81,6	35,4	10,8	105,9
280	3,8	64,3	17,6	10,7	104,9
281	5	42,1	8,1	5,4	53,0
283	3,8	39,8	7,1	8,5	83,4

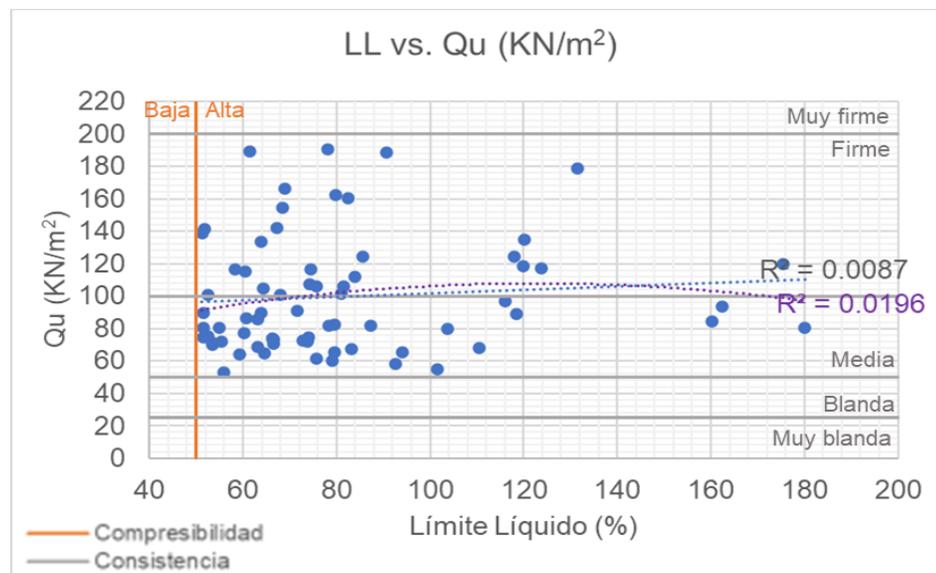
# Muestra	Prof. (m)	LL (%)	IP (%)	Qu (Ton/m <sup>2</sup> )	Qu (KN/m <sup>2</sup> )
284	3,5	38,2	7,2	13,2	129,4
285	5	48,6	13,2	8,5	83,4
288	6	118,5	53,9	9,1	89,2
289	4	131,6	62,5	18,2	178,5
291	5	75,6	31,7	10,8	105,9
292	4,2	63,9	25,5	13,6	133,4
293	3,5	85,7	36,1	12,7	124,5
Promedio		76,1	23,3	10,3	101,2
Mínimo		34,2	3,5	0,7	7,1
Máximo		180,1	70,9	28,9	283,6

En la Figura A3- 1 se presenta el gráfico de dispersión para las 96 muestras comprendidas en el rango de tres a seis metros de profundidad (Límite Líquido en el eje de las abscisas y resistencia a la compresión inconfina en las ordenadas). Aquí se evidencia que el 85% de las muestras evaluadas exhiben un Límite Líquido superior a 50%, es decir, tienen alta compresibilidad, y de acuerdo con los resultados de resistencia a la compresión inconfina, el 84% oscila entre consistencia media y firme. Para este caso, 69 muestras se concentran en las zonas con mayor cantidad de puntos (72%) mencionadas anteriormente: Límite Líquido superior a 50% y resistencia a la compresión inconfina entre 50 y 200 KN/m<sup>2</sup>. Se observa que la dispersión no sigue un patrón de linealidad, y su correlación es muy baja (0,0421).



**Figura A3- 1.** Gráfico de dispersión de las muestras entre tres y seis metros para Límite Líquido (%) vs. Qu (KN/m<sup>2</sup>).

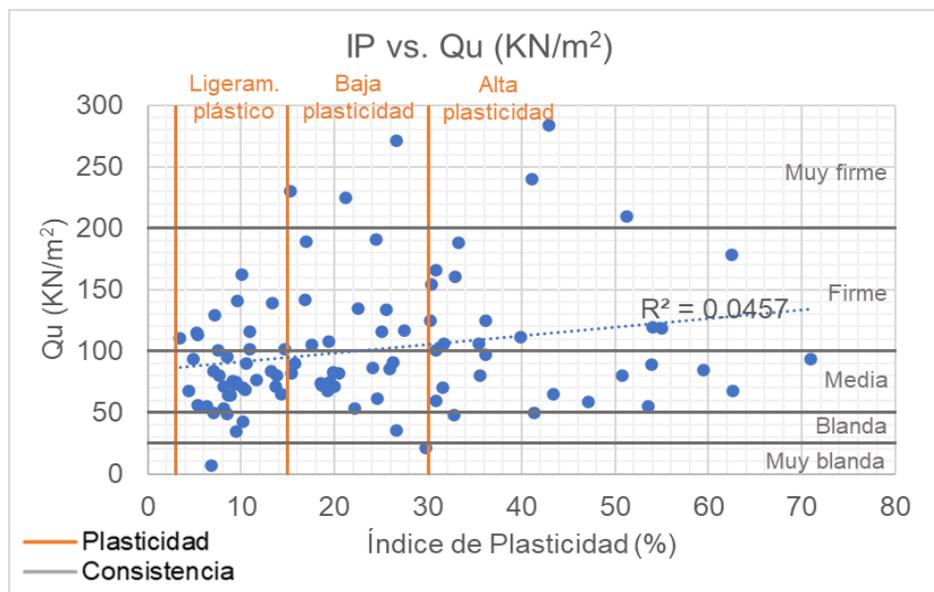
Para un mayor detalle de esta zona con alta concentración de puntos, se elaboró la gráfica contenida en la Figura A3- 2, donde la distribución de los mismos disminuye su linealidad con respecto al análisis de la totalidad de las muestras en el rango de tres a seis metros de profundidad, pasando de tener una regresión de 0,0421 (muy baja) a 0,0087. La ecuación con mayor grado de correlación, corresponde a una polinómica de grado dos (línea morada), la cual tiene una regresión de 0,0196, también muy baja.



**Figura A3- 2.** Gráfico de dispersión para el área donde se concentra la mayoría de las muestras entre tres y seis metros, compresibilidad alta ( $LL > 50\%$ ) vs. consistencia media y firme (RCI entre 50 y 200  $\text{KN/m}^2$ ).

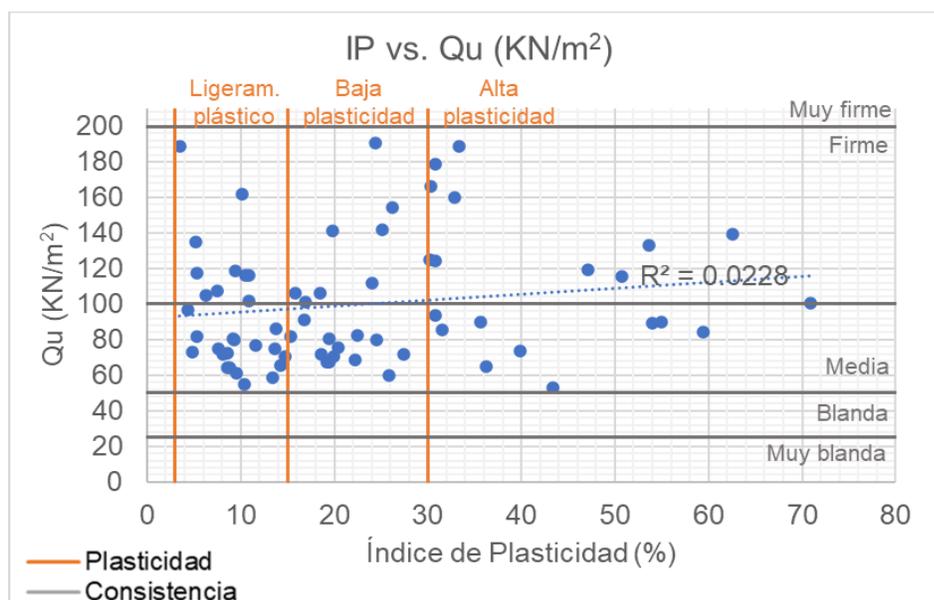
Para las variables de Índice de Plasticidad (%) vs. resistencia a la compresión inconfínada ( $\text{KN/m}^2$ ), se elaboró la gráfica mostrada en la Figura A3- 3, donde no se evidencia una concentración marcada de puntos, asociada a alguna de las regiones de plasticidad, ya que 38 de ellas son ligeramente plásticas (40%), 28 tienen baja plasticidad (29%) y 30 tienen alta plasticidad (31%).

Al revisar la regresión lineal para la correlación de las dos variables – Índice de Plasticidad (%) y resistencia a la compresión inconfínada ( $\text{KN/m}^2$ ) –, se encuentra de nuevo un valor muy bajo (0,0457), cercano al obtenido en la correlación del Límite Líquido con la resistencia a la compresión inconfínada.



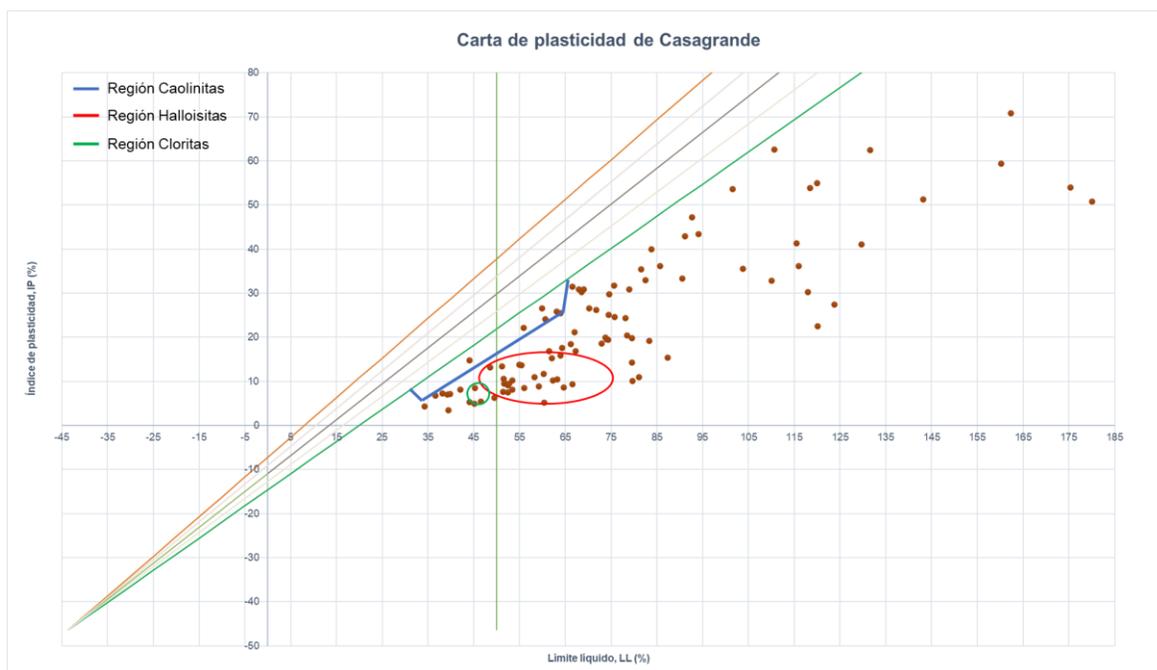
**Figura A3- 3.** Gráfico de dispersión de las muestras entre tres y seis metros para Índice de Plasticidad (%) vs. Qu (KN/m<sup>2</sup>).

Una vez se extraen únicamente los puntos que oscilan entre consistencia media y firme (zona donde se localizan la mayoría de datos de resistencia a la compresión inconfina para la profundidad de tres a seis metros), la regresión lineal disminuye, pasando a 0,0228 (Figura A3- 4).



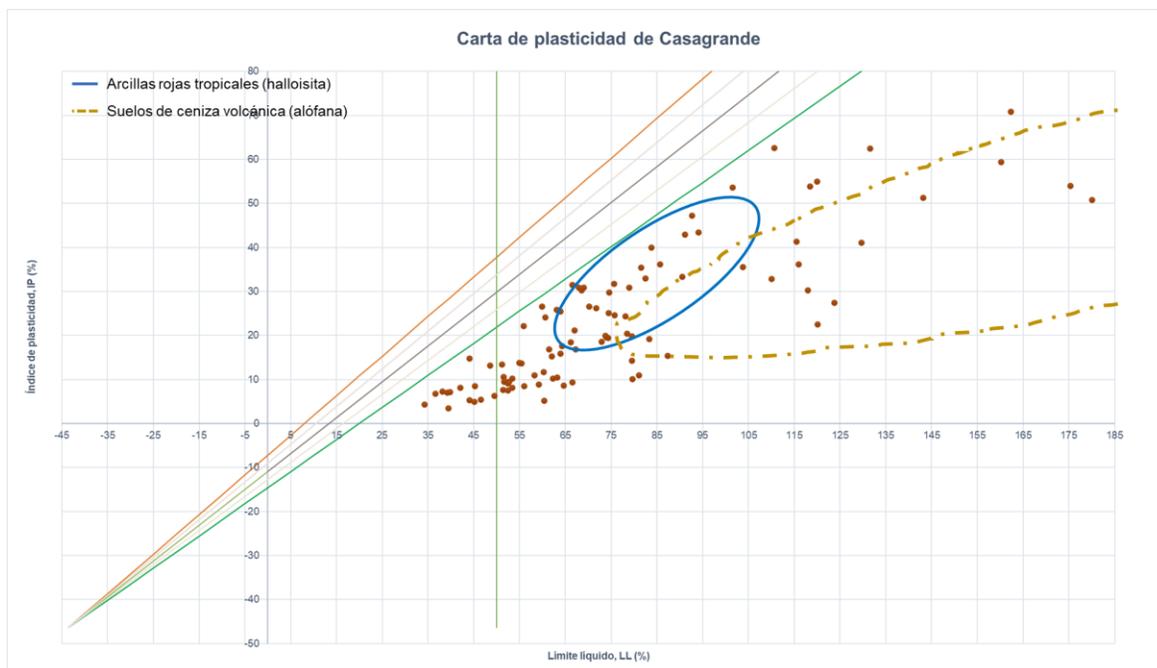
**Figura A3- 4.** Gráfico de dispersión para el área donde se concentra la mayoría de las muestras entre tres y seis metros, Índice de Plasticidad vs. consistencia media y firme (RCI entre 50 y 200 KN/m<sup>2</sup>).

Al ubicar las 96 muestras que hacen parte del rango de tres a seis metros de profundidad, en la carta de plasticidad de Casagrande modificada por Mitchell en 1976 (Figura A3- 5), se identifican cerca de 23 puntos en el área de las halloisitas (24%), 6 en el área de las caolinitas (6%), y 2 en la región de las cloritas (2%). En el gráfico de dispersión, todos los puntos se ubican debajo de la línea A, con orientación hacia el oriente del plano cartesiano.



**Figura A3- 5.** Carta de plasticidad de Casagrande modificada por Mitchell (1976), en la cual se localizan las muestras de tres a seis metros de profundidad.

Para la carta de plasticidad de Casagrande modificada por Wesley (1973, 2010), se tienen 26 muestras en la región asociada al mineral de halloisita (27% del total) y 17 en el área de suelos de ceniza volcánica asociados a alófana (18% del total), exhibiendo que el mayor porcentaje de muestras entre tres y seis metros de profundidad, no se concentran en las áreas demarcadas (Figura A3- 6).



**Figura A3- 6.** Carta de plasticidad de Casagrande modificada por Wesley (1973, 2010), en la cual se localizan las muestras de tres a seis metros de profundidad.

### A3-2 Muestras de seis a nueve metros de profundidad

En la Tabla A3- 2 se presenta el resumen de los resultados obtenidos para las 53 muestras que se encuentran en este rango de profundidad, el cual corresponde al tercer grupo con mayor número de datos para analizar. El Límite Líquido oscila entre 37 y 203%, con un promedio de 98%, lo cual indica que en su mayoría las muestras tienen alta compresibilidad ( $LL > 50\%$ ). Por su parte, el Índice Plasticidad promedio, es de 29,7%, asociado a baja plasticidad.

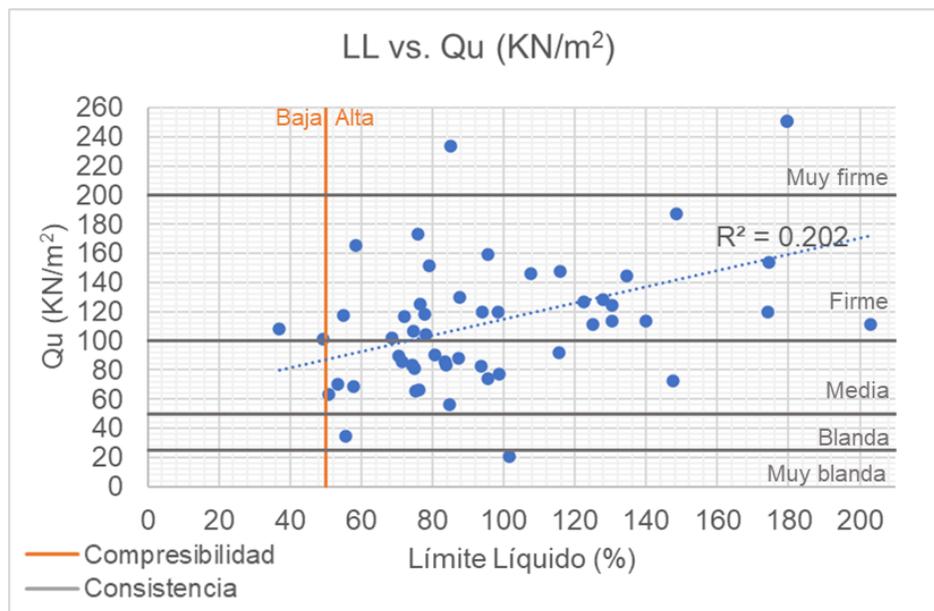
La resistencia última del ensayo de compresión inconfina, exhibe un promedio de 114  $\text{KN/m}^2$ , correlacionable con una resistencia firme. Para este parámetro, se tiene que las muestras oscilan entre 21  $\text{KN/m}^2$  y 251  $\text{KN/m}^2$ , es decir, son de consistencia variable entre muy blanda y muy firme.

**Tabla A3- 2.** Límites de Atterberg y resistencia a la compresión inconfina para muestras de seis a nueve metros.

# Muestra	Prof. (m)	LL (%)	IP (%)	Qu (Ton/m <sup>2</sup> )	Qu (KN/m <sup>2</sup> )
4	7,5	107,6	34,9	14,9	146,1
6	8	115,9	34,8	15,0	147,5

# Muestra	Prof. (m)	LL (%)	IP (%)	Qu (Ton/m <sup>2</sup> )	Qu (KN/m <sup>2</sup> )
7	8	98,8	29,7	7,9	77,2
14	9	87,6	36,7	13,2	129,6
16	9	87,3	31,6	9,0	88,1
21	7	68,7	21,7	10,4	102,1
22	8	55,7	4,2	3,5	34,5
24	7	202,9	41,1	11,4	111,5
28	7	72,2	18,1	11,9	116,5
29	9	101,5	24,5	2,1	20,9
31	8	74,8	13,7	8,3	81,3
47	7	75,3	17,6	6,7	65,2
48	6,5	76,1	13,3	6,8	66,2
50	7,5	70,5	18,4	9,2	89,8
55	8	36,9	4,2	11,1	108,4
57	8	147,5	52,0	7,4	72,2
58	8	140,0	37,9	11,6	113,5
60	8	130,5	39,4	12,7	124,8
63	9	83,4	23,4	8,8	86,1
69	7	84,7	9,4	5,8	56,4
73	8	79,1	27,2	15,5	151,8
86	7	174,4	51,7	15,7	154,1
98	7	71,5	22,6	8,7	85,7
102	8	179,6	44,9	25,6	250,9
109	7	77,9	22,2	12,1	118,7
110	9	98,5	28,8	12,3	120,1
116	9	93,8	26,7	12,2	119,9
118	9	95,5	28,9	16,2	159,1
124	7	74,7	20,9	10,9	106,9
125	9	80,7	18,6	9,2	90,2
135	7	85,0	17,0	23,8	233,4
136	7	76,6	18,0	12,7	124,9
137	7	58,3	19,9	16,9	165,7
139	8	50,8	5,1	6,4	63,1
141	7,5	53,5	14,2	7,2	70,4
142	7,5	93,5	23,5	8,5	83,0
144	7	115,6	29,6	9,4	92,0
149	7	74,2	14,6	8,5	83,3
166	8	179,6	44,9	25,6	250,9
177	8	122,5	38,4	12,9	126,7
180	7,5	55,0	11,0	12,0	117,7
193	8	95,5	29,6	7,5	73,8
196	9	125,2	45,5	11,4	111,5
198	7	49,4	14,4	10,3	101,4
201	8,2	57,9	19,7	7,0	69,0
219	9	75,9	35,7	17,7	173,1
231	9	134,4	66,2	14,7	144,4
239	9	130,3	58,5	11,6	113,9
242	9	174,3	72,9	12,2	120,1
244	7	148,4	76,8	19,1	187,6
246	9	127,8	63,8	13,1	128,1
256	9	83,8	35,2	8,5	83,3
263	9	78,0	19,5	10,6	104,2
Promedio		97,9	29,7	11,6	113,5
Mínimo		36,9	4,2	2,1	20,9
Máximo		202,9	76,8	25,6	250,9

En la Figura A3- 7 se grafican las variables de Límite Líquido (%) y resistencia a la compresión inconfínada ( $\text{KN/m}^2$ ) para los puntos correspondientes a profundidades de seis a nueve metros. Aquí existe un fuerte predominio de suelos con alta compresibilidad, donde el 96% de las muestras presenta Límite Líquido superior a 50%. En cuanto a la consistencia, evaluada en función de la resistencia a la compresión inconfínada, el 91% del total de puntos se encuentra en la región de media y firme (48 muestras con resistencia a la compresión inconfínada entre 50 y 200  $\text{KN/m}^2$ ). En la gráfica se observa que, para el caso de la correlación lineal, su regresión continúa siendo baja (0,202), pero es superior a la obtenida para los rangos de cero a tres metros y de tres a seis metros.

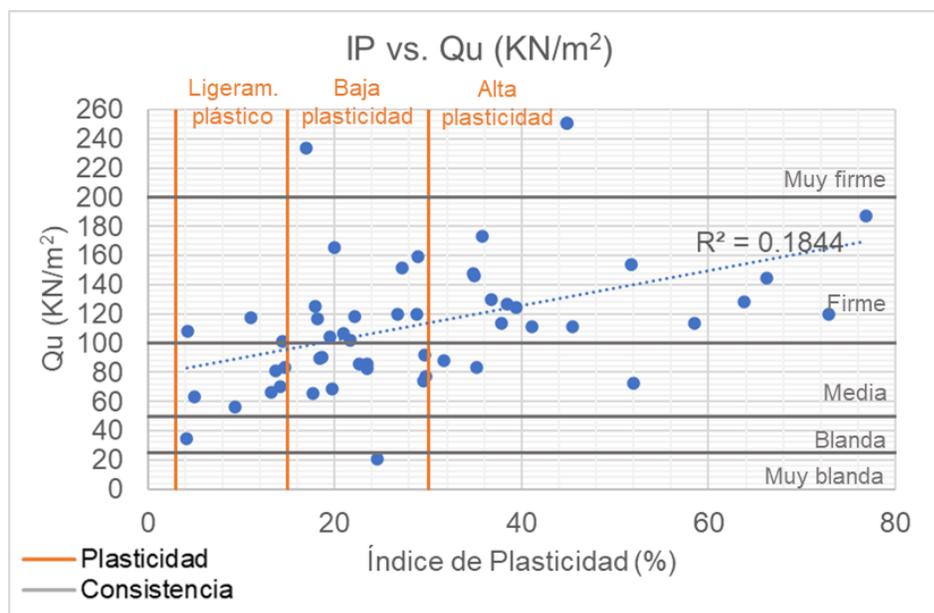


**Figura A3- 7.** Gráfico de dispersión de las muestras entre tres y seis metros para Límite Líquido (%) vs.  $Q_u$  ( $\text{KN/m}^2$ ).

Para las variables de Índice de Plasticidad (%) y resistencia a la compresión inconfínada ( $\text{KN/m}^2$ ), se graficaron los puntos del mismo modo, reemplazando las abscisas, donde estaba el Límite Líquido (%), por el Índice de Plasticidad (%). En la Figura A3- 8 se muestra el diagrama para dichas variables, y se evidencia un predominio de suelos con baja plasticidad

(23 muestras de 53, es decir, 43%), seguido de suelos con alta plasticidad (20 de 53, es decir, 38%), y en último lugar, 10 muestras ligeramente plásticas (19% del total).

Al asociar las dos variables en cuestión, se tiene una regresión baja para un tipo de correlación lineal (0.1844), pero superior a la regresión de los otros rangos de profundidad ya plasmados.

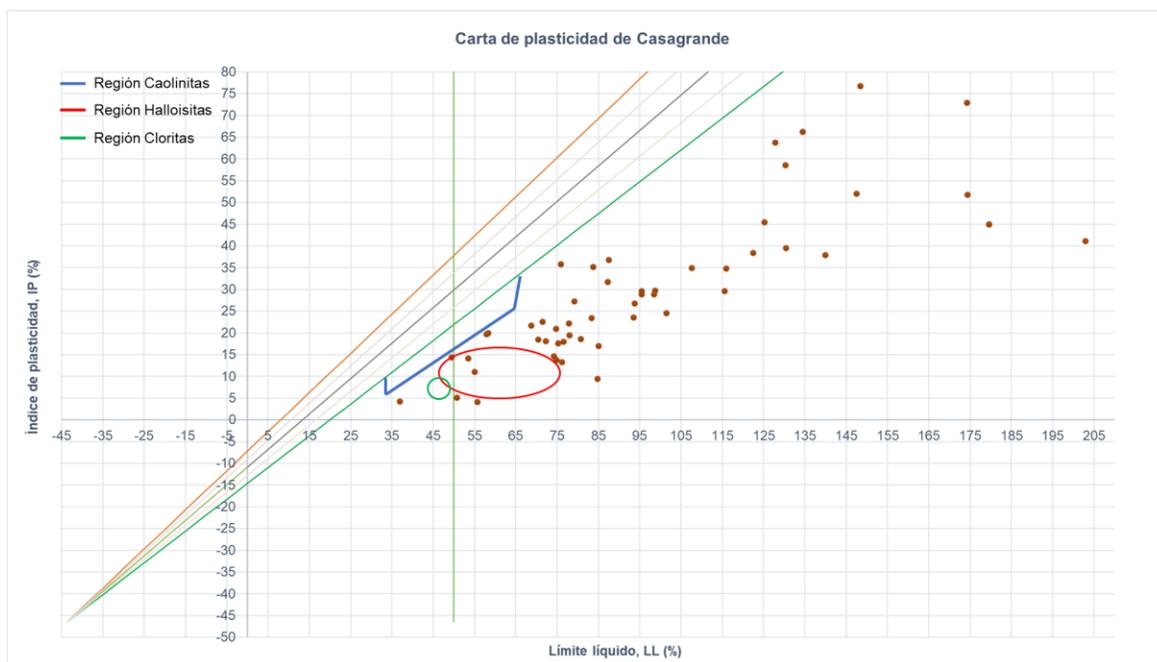


**Figura A3- 8.** Gráfico de dispersión de las muestras entre seis y nueve metros para Índice de Plasticidad (%) vs. Qu (KN/m<sup>2</sup>).

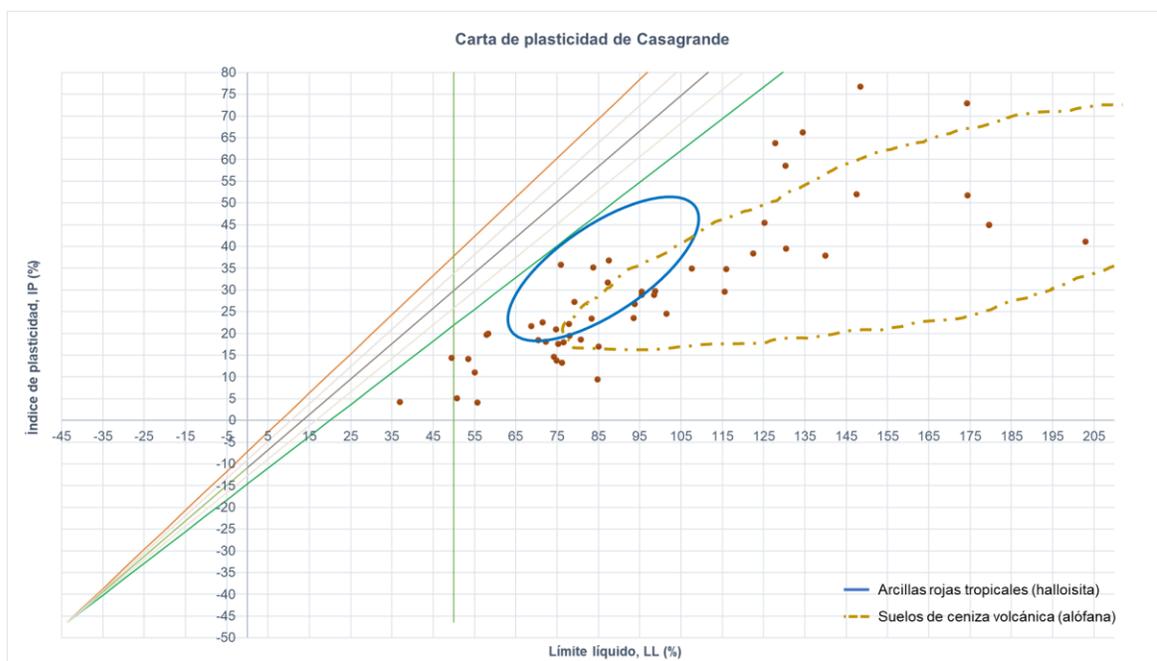
Teniendo en cuenta que la distribución de los puntos evaluados para las diferentes áreas de caracterización (compresibilidad alta/baja; plasticidad ligera/baja/alta; consistencia muy firme/firme/media/blanda/muy blanda), no presenta concentraciones que requieran un análisis adicional, se procede a ubicar las muestras en la carta de plasticidad de Casagrande con sus respectivas modificaciones por Mitchell (1976) y Wesley (1973, 2010).

Al localizar las 53 muestras, se identifica que solo dos (2) de ellas se encierran en los círculos de minerales característicos propuestos por Mitchell en 1976 (Figura A3- 9), mientras que de acuerdo con la sectorización de Wesley (1973, 2010), 12 muestras clasifican como arcillas rojas tropicales con minerales de halloisita (23%), 23 como suelos de ceniza volcánica con minerales de alófana (43%), y 5 de estas se encuentran en la intersección de

las dos regiones (Figura A3- 10). Al igual que en los otros rangos de profundidad ya evaluados, todas las muestras se localizan debajo de la línea A.



**Figura A3- 9.** Carta de plasticidad de Casagrande modificada por Mitchell (1976), en la cual se localizan las muestras de seis a nueve metros de profundidad.



**Figura A3- 10.** Carta de plasticidad de Casagrande modificada por Wesley (1973, 2010), en la cual se localizan las muestras de seis a nueve metros de profundidad.

### A3-3 Muestras de nueve a doce metros de profundidad

En este rango de profundidad se tienen 34 de las 293 muestras del estudio (12%), y en la Tabla A3- 3 se resumen sus resultados, para las variables a correlacionar. El Límite Líquido promedio es más alto que el de las profundidades anteriormente descritas, y al igual que en estas, indica un predominio de suelos con alta compresibilidad, ya que es superior a 50% (104%), y su Índice de Plasticidad promedio (también superior a las profundidades anteriores) permite correlacionar las muestras con una plasticidad alta (32%). Por su parte, la resistencia última del ensayo de compresión inconfiada, exhibe un promedio de 104 KN/m<sup>2</sup>, asociado a una resistencia firme. Para este parámetro, las muestras oscilan en un rango amplio entre 39,2 KN/m<sup>2</sup> y 191,4 KN/m<sup>2</sup>, es decir, son de consistencia variable entre muy blanda y firme.

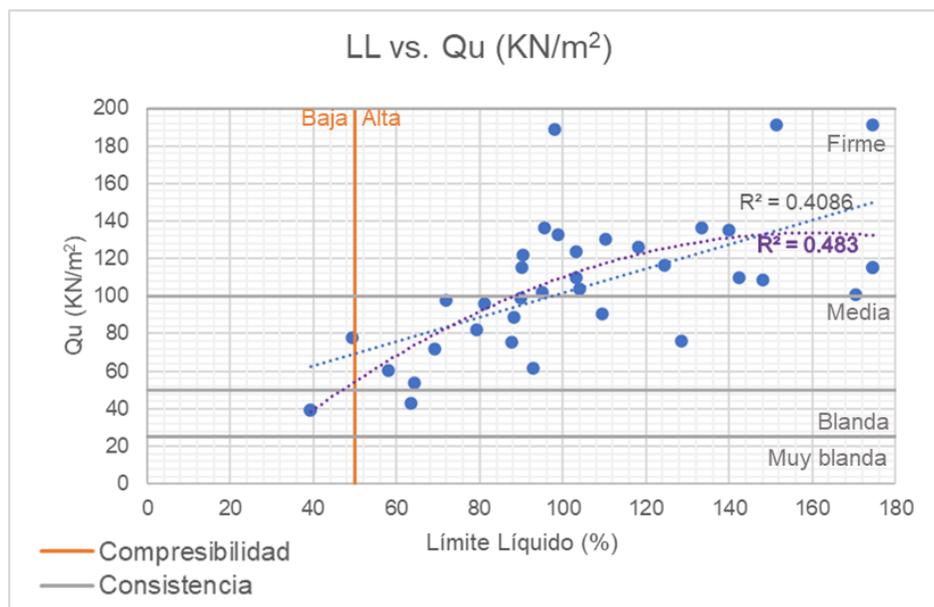
**Tabla A3- 3.** Límites de Atterberg y resistencia a la compresión inconfiada para muestras de nueve a doce metros.

# Muestra	Prof. (m)	LL (%)	IP (%)	Qu (Ton/m <sup>2</sup> )	Qu (KN/m <sup>2</sup> )
36	11	49,3	9,9	7,9	77,6
40	12	87,8	34,0	7,7	75,7
64	11	64,1	11,9	5,5	53,8
66	12	94,9	21,0	10,4	101,9
70	10,5	79,1	24,0	8,4	81,9
74	12	88,1	31,4	9,1	88,8
96	10,5	69,2	9,5	7,3	71,6
97	12	170,3	42,2	10,3	100,8
99	11	124,5	38,9	11,9	116,4
103	10	174,5	47,0	11,7	115,1
119	12	98,0	29,4	19,2	188,6
121	10	98,7	38,8	13,5	132,4
127	10	81,2	24,5	9,8	96,1
128	12	90,3	25,9	12,4	121,6
146	10	103,2	42,6	12,6	123,8
150	10	63,4	13,3	4,4	42,9
151	10	103,1	34,9	11,2	109,6
152	10	128,4	39,9	7,8	76,1
153	10	118,1	40,5	12,9	126,2
161	11	151,4	39,2	19,5	191,4
163	11	148,0	39,4	11,1	108,7
164	12	140,0	28,5	13,8	135,3
167	10	174,5	47,0	11,7	115,1
178	10	95,5	24,1	13,9	136,2
181	12	39,2	8,1	4,0	39,2
194	11,5	58,0	16,3	6,2	60,3
199	9,7	90,2	42,2	11,7	115,1
220	12	71,9	32,7	10,0	98,0
224	12	142,4	40,9	11,2	109,5

# Muestra	Prof. (m)	LL (%)	IP (%)	Qu (Ton/m <sup>2</sup> )	Qu (KN/m <sup>2</sup> )
228	10	133,4	62,8	13,9	136,6
232	12	110,2	53,1	13,3	130,2
236	12	89,8	42,8	10,1	98,8
258	9,5	92,8	15,1	6,3	61,4
261	12	109,4	31,0	9,2	90,6
Promedio		103,9	31,8	10,6	103,8
Mínimo		39,2	8,1	4,0	39,2
Máximo		174,5	62,8	19,5	191,4

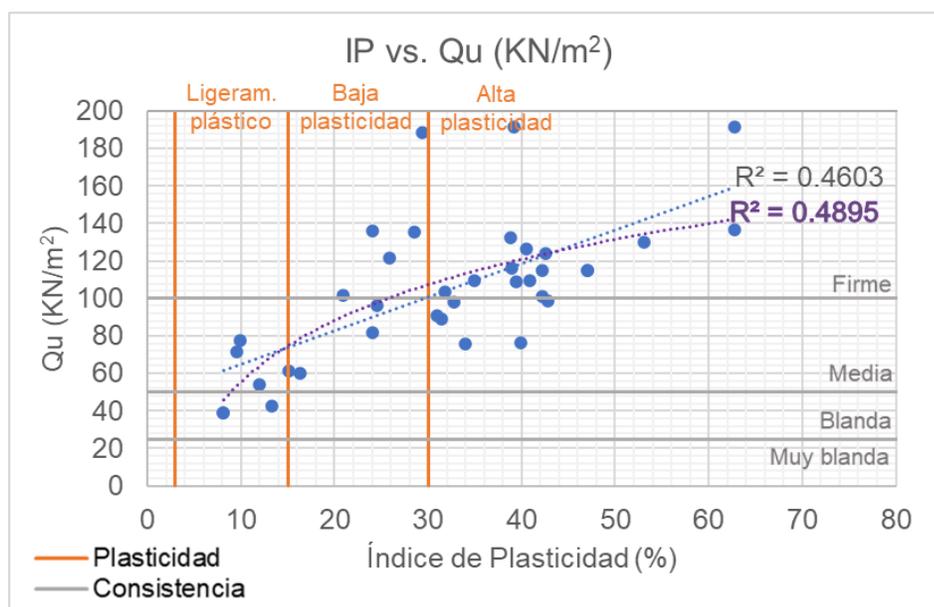
En la Figura A3- 11 se grafican los 34 puntos correspondientes a profundidades de nueve a doce metros, donde en el eje de las abscisas se ubica el valor de Límite Líquido (%) y en las ordenadas la resistencia a la compresión inconfínada (KN/m<sup>2</sup>). El 94% de estas muestras presenta compresibilidad alta, asociada a un Límite Líquido superior a 50%. Así mismo, la consistencia en función de la resistencia a la compresión inconfínada, se describe como media para el 38% de las muestras (entre 50 y 100 KN/m<sup>2</sup>) y firme para el 56% (entre 100 y 200 KN/m<sup>2</sup>).

Al analizar la dispersión de los puntos, se observa que aunque no es suficiente para ajustarse a una correlación de tipo lineal, su valor es mayor que en los casos evaluados anteriormente (0,4086), y es más alto si se revisa la regresión para una ecuación polinómica de grado dos (0,483).



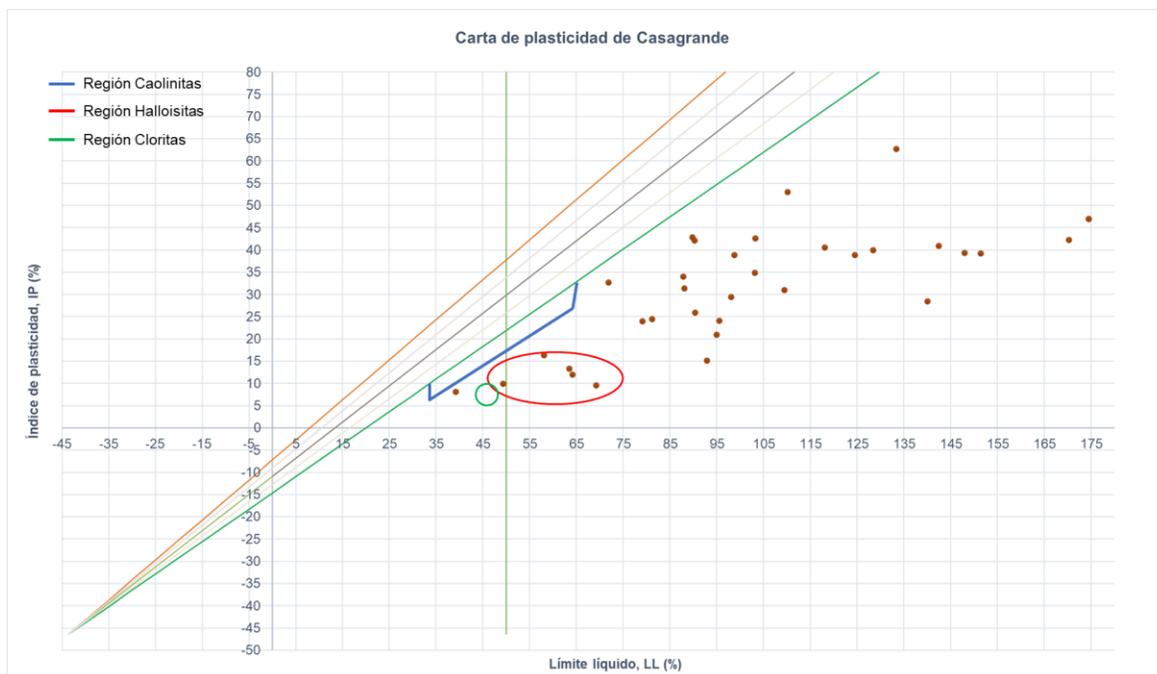
**Figura A3- 11.** Gráfico de dispersión de las muestras entre nueve y doce metros para Límite Líquido (%) vs. Qu (KN/m<sup>2</sup>).

En la Figura A3- 12 se graficaron los puntos del mismo modo, reemplazando el eje del Límite Líquido (%) por el Índice de Plasticidad (%), para revisar el grado de correlación de esta variable con respecto a la resistencia a la compresión inconfiada ( $\text{KN/m}^2$ ). Para este caso se evidencia el predominio de muestras con alta plasticidad (20 de 34, es decir, 59%), seguido de nueve (9) muestras que exhiben baja plasticidad (con IP entre 15 y 30%, es decir, 26% del total), y cinco (5) ligeramente plásticas (con IP entre 3 y 15%, es decir, 15% del total), cuya regresión lineal es de 0,4603, y logarítmica de 0,4895.



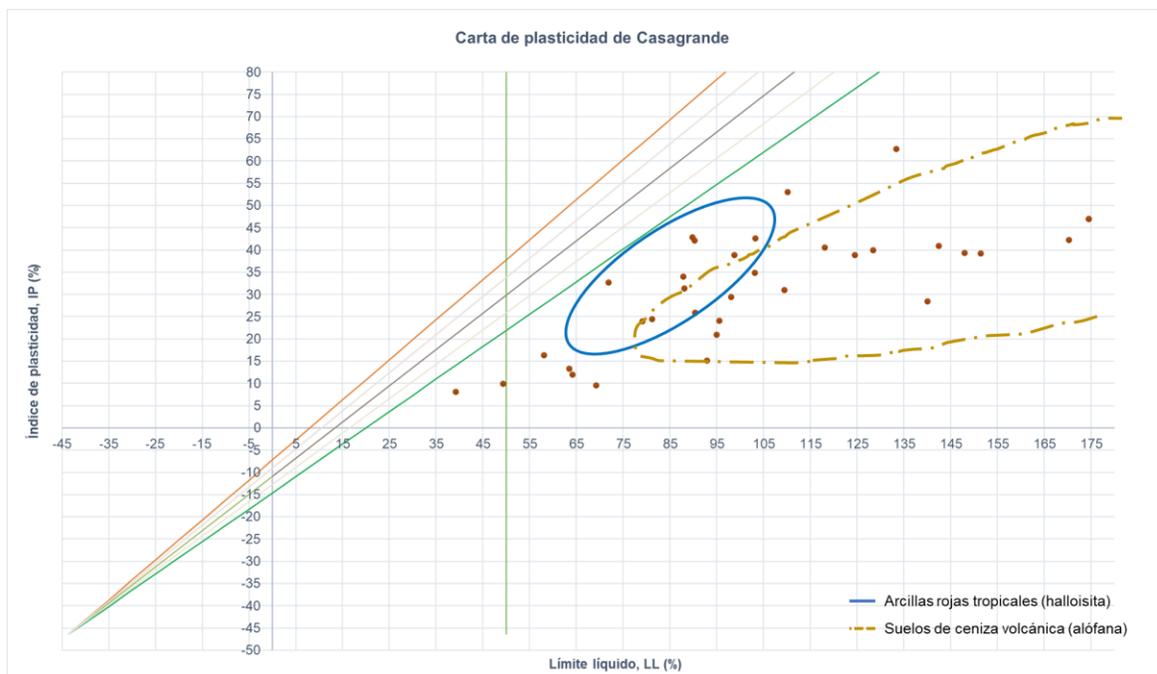
**Figura A3- 12.** Gráfico de dispersión de las muestras entre nueve y doce metros para Índice de Plasticidad (%) vs.  $Q_u$  ( $\text{KN/m}^2$ ).

Al localizar las 34 muestras que se tienen de nueve a doce metros de profundidad, en la carta de plasticidad de Casagrande modificada por Mitchell en 1976 (Figura A3- 13), se identifica que cinco de ellas se encuentran en la región de minerales característicos asociados a halloisitas, y un mayor porcentaje está por fuera de las áreas señaladas por el autor. Todas las muestras se localizan debajo de la línea A.



**Figura A3- 13.** Carta de plasticidad de Casagrande modificada por Mitchell (1976), en la cual se localizan las muestras de nueve a doce metros de profundidad.

Del mismo modo, en la Figura A3- 14 se ubican los puntos en la carta de plasticidad de Casagrande, ahora modificada por Wesley (1973, 2010), donde se adicionan dos áreas correspondientes a arcillas rojas tropicales asociadas al mineral de halloisita (encerrada en azul), y suelos de ceniza volcánica asociados a alófana (línea punteada). Dentro de la región de halloisita se tienen 10 muestras (29% del total), y para la región asociada a alófana, se tienen 16 muestras (47% del total), mientras que tres de ellas coinciden con las dos áreas. Se observa que la mayoría de las muestras se concentran en las áreas demarcadas.



**Figura A3- 14.** Carta de plasticidad de Casagrande modificada por Wesley (1973, 2010), en la cual se localizan las muestras de nueva a doce metros de profundidad.

### A3-4 Muestras de doce a quince metros de profundidad

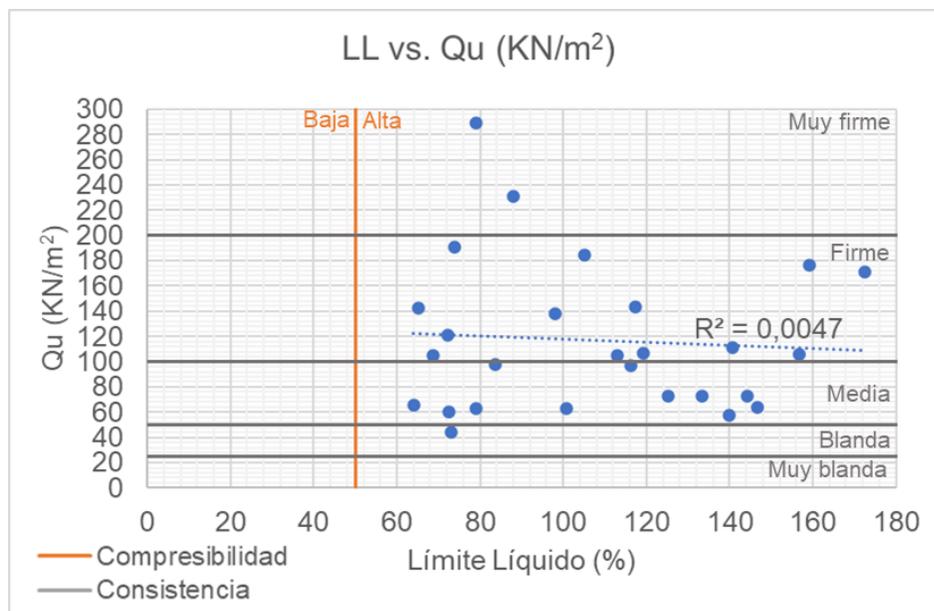
A partir de seis metros de profundidad, se observa que la cantidad de muestras por rango va disminuyendo (es decir, se va haciendo menos representativa), y para el caso de doce a quince metros de profundidad, se tienen 27 puntos de análisis, cuyos resultados para las variables a comparar se encuentran consignados en la Tabla A3- 4.

El Límite Líquido oscila entre 64 y 172%, indicando que todas las muestras se asocian a una compresibilidad alta ( $LL > 50\%$ ), y su Índice de Plasticidad promedio permite correlacionar las muestras con una plasticidad alta (35%). Tanto el promedio de Límite Líquido como el Índice de Plasticidad, aumentaron con la profundidad. Por su parte, la resistencia última del ensayo de compresión inconfiada, exhibe un promedio de  $117 \text{ KN/m}^2$ , correlacionable con una resistencia firme.

**Tabla A3- 4.** Límites de Atterberg y resistencia a la compresión inconfínada para muestras de doce a quince metros.

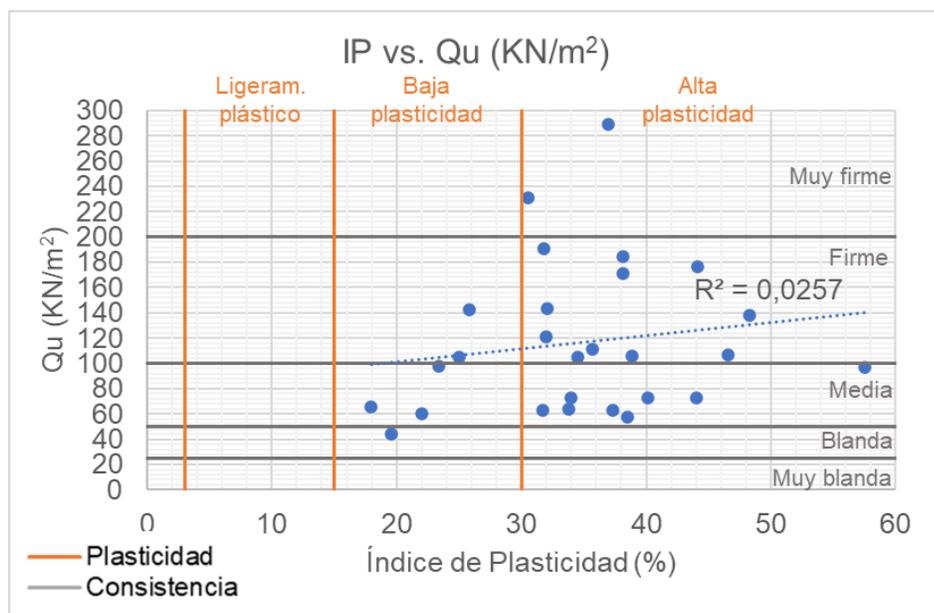
# Muestra	Prof. (m)	LL (%)	IP (%)	Qu (Ton/m <sup>2</sup> )	Qu (KN/m <sup>2</sup> )
12	14	119,2	46,6	10,9	106,6
15	14	125,3	44,0	7,4	72,8
17	14	100,9	31,7	6,4	62,6
30	13	73,0	19,6	4,5	44,0
38	13	64,0	17,9	6,7	65,9
41	14	72,4	22,0	6,2	60,6
71	14	83,7	23,4	10,0	98,0
100	13	172,4	38,1	17,4	171,0
104	12,2	74,0	31,8	19,5	191,0
111	15	88,1	30,5	23,5	230,8
114	15	117,4	32,1	14,6	143,6
117	15	140,6	35,7	11,3	111,1
122	13	113,1	34,5	10,7	105,3
126	13	144,3	40,1	7,4	72,6
129	14	146,8	33,8	6,5	63,7
130	15	159,3	44,1	18,0	176,5
132	15	105,0	38,1	18,8	184,4
133	13	156,8	38,9	10,8	105,9
143	12,5	133,5	34,0	7,4	72,7
160	14	65,2	25,8	14,6	142,8
162	14	139,9	38,5	5,9	57,9
221	15	98,0	48,3	14,1	138,2
225	15	79,1	37,0	29,5	289,5
233	15	116,2	57,5	9,9	97,3
237	15	68,7	25,0	10,7	105,0
240	13	79,1	37,4	6,4	62,8
243	15	72,2	31,9	12,4	121,4
Promedio		107,7	34,8	11,9	116,8
Mínimo		64,0	17,9	4,5	44,0
Máximo		172,4	57,5	29,5	289,5

En la Figura A3- 15 se presenta el gráfico de dispersión para las 27 muestras comprendidas en el rango de doce a quince metros de profundidad (Límite Líquido en el eje de las abscisas y resistencia a la compresión inconfínada en las ordenadas). Aquí se evidencia que el 89% de las muestras evaluadas oscila entre consistencia media y firme, y se observa que la dispersión no sigue un patrón de linealidad, y su correlación es más baja que en los otros rangos de profundidades (0.0047).



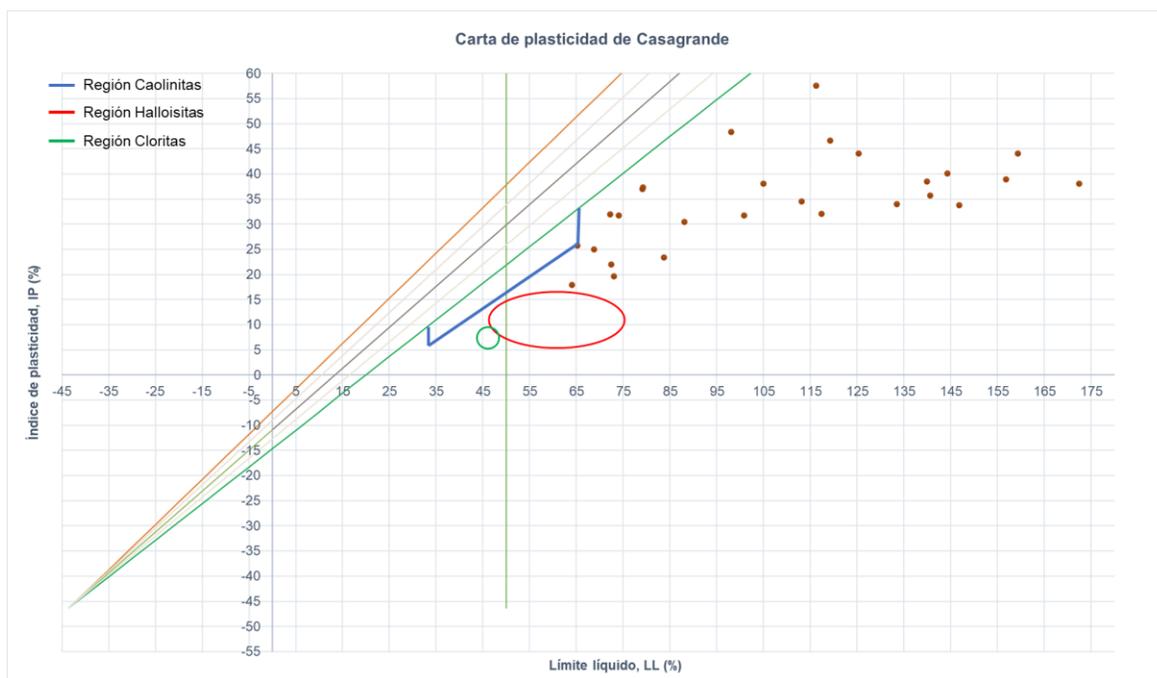
**Figura A3- 15.** Gráfico de dispersión de las muestras entre doce y quince metros para Límite Líquido (%) vs. Qu (KN/m<sup>2</sup>).

Para las variables de Índice de Plasticidad (%) y resistencia a la compresión inconfiada (KN/m<sup>2</sup>), se graficaron los puntos en la Figura A3- 16, donde se aprecia un predominio de suelos con alta plasticidad (21 muestras de 27, es decir, 78%). Al asociar las dos variables en cuestión, se tiene una regresión muy baja para un tipo de correlación lineal (0.0257).

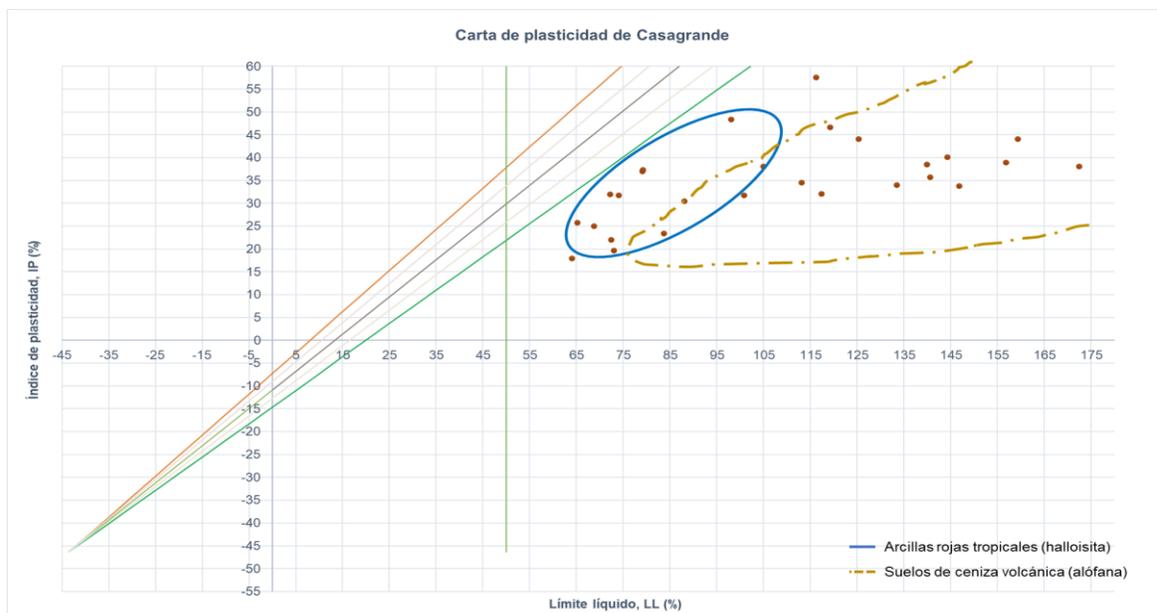


**Figura A3- 16.** Gráfico de dispersión de las muestras entre doce y quince metros para Índice de Plasticidad (%) vs. Qu (KN/m<sup>2</sup>).

A continuación, se procedió a ubicar las muestras en la carta de plasticidad de Casagrande con sus respectivas modificaciones por Mitchell (1976) (Figura A3- 17) y Wesley (1973, 2010) (Figura A3- 18). Para la carta modificada por Mitchell, no se observa que alguno de los puntos mapeados corresponda con los tipos de minerales que encierran las diferentes regiones, mientras que, en la carta modificada por Wesley, 12 muestras clasifican como arcillas rojas tropicales (halloisita), 16 como ceniza volcánica con minerales de alófana, y 2 hacen parte de la intersección de las dos regiones. Del mismo modo que en otros rangos de profundidad ya evaluados, todas las muestras se localizan debajo de la línea A.



**Figura A3- 17.** Carta de plasticidad de Casagrande modificada por Mitchell (1976), en la cual se localizan las muestras de doce a quince metros de profundidad.



**Figura A3- 18.** Carta de plasticidad de Casagrande modificada por Wesley (1973, 2010), en la cual se localizan las muestras de doce a quince metros de profundidad.

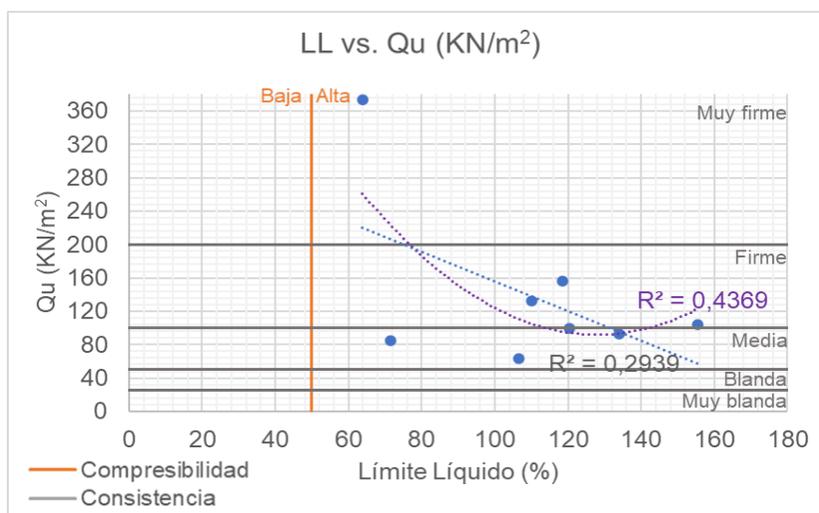
### A3-5 Muestras de quince a veintidós metros de profundidad

Para finalizar la sectorización por profundidad, se agruparon las 8 muestras restantes en un amplio rango de quince a veintidós metros, ya que no se contaba con una cantidad representativa de datos. Estos resultados se resumen en la Tabla A3- 5 e indican que, de acuerdo con el Límite Líquido promedio, todas las muestras tienen alta compresibilidad, y según el Índice de Plasticidad promedio, todas son de plasticidad alta. La variable de resistencia a la compresión inconfiada oscila en un amplio rango entre 63 KN/m<sup>2</sup> y 374 KN/m<sup>2</sup>.

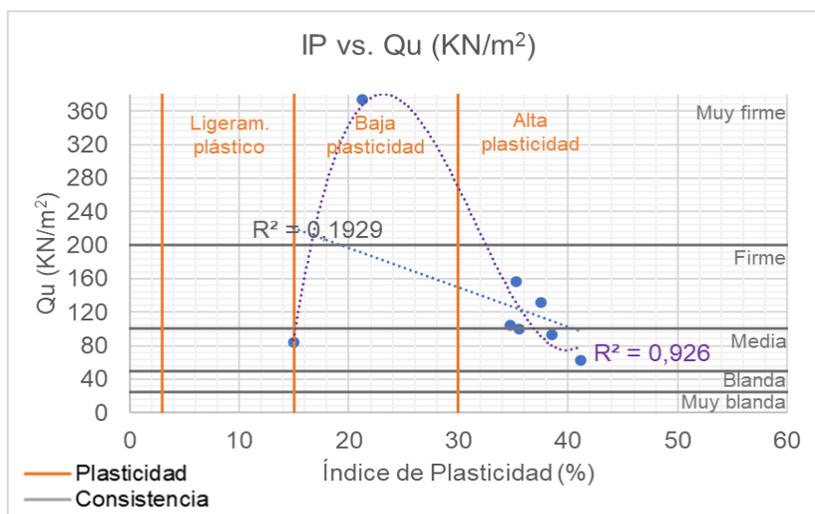
**Tabla A3- 5.** Límites de Atterberg y resistencia a la compresión inconfiada para muestras de quince a veintidós metros.

# Muestra	Prof. (m)	LL (%)	IP (%)	Qu (Ton/m <sup>2</sup> )	Qu (KN/m <sup>2</sup> )
39	16	106,6	41,2	6,4	62,9
67	16	71,6	14,9	8,6	84,4
112	18	110,2	37,5	13,5	131,9
115	18	118,4	35,3	16,0	156,7
134	16	63,8	21,2	38,1	373,6
165	15,5	155,5	34,7	10,6	104,0
68	20	120,5	35,6	10,2	99,6
75	20	133,9	38,5	9,5	93,1
Promedio		110,1	32,4	14,1	138,3
Mínimo		63,8	14,9	6,4	62,9
Máximo		155,5	41,2	38,1	373,6

En la Figura A3- 19 se grafican las variables de Límite Líquido (%) y resistencia a la compresión inconfiada ( $\text{KN/m}^2$ ) para los ocho puntos, y en la Figura A3- 20 las variables de Índice de Plasticidad (%) y resistencia a la compresión inconfiada ( $\text{KN/m}^2$ ). En estas se evidencia una mayor regresión para ecuaciones polinómicas de grado 2 (0,4369) y de grado 3 (0,926) respectivamente, asociada a que el análisis se lleva a cabo con una menor cantidad de muestras.



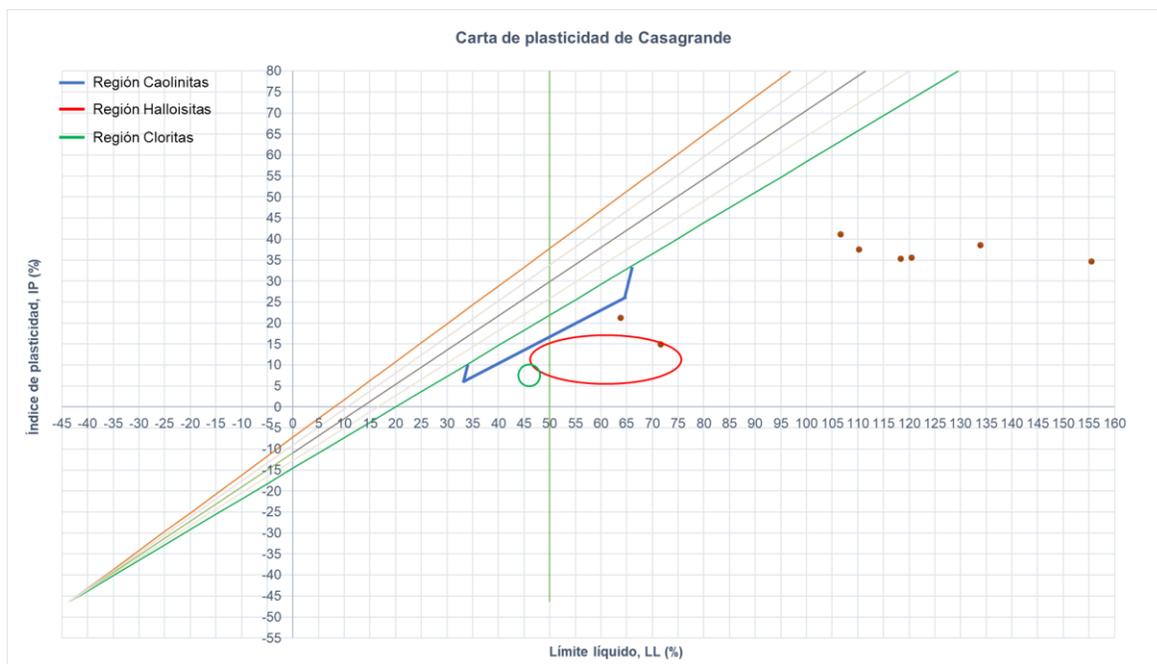
**Figura A3- 19.** Gráfico de dispersión de las muestras entre quince y veintiún metros para Límite Líquido (%) vs.  $Q_u$  ( $\text{KN/m}^2$ ).



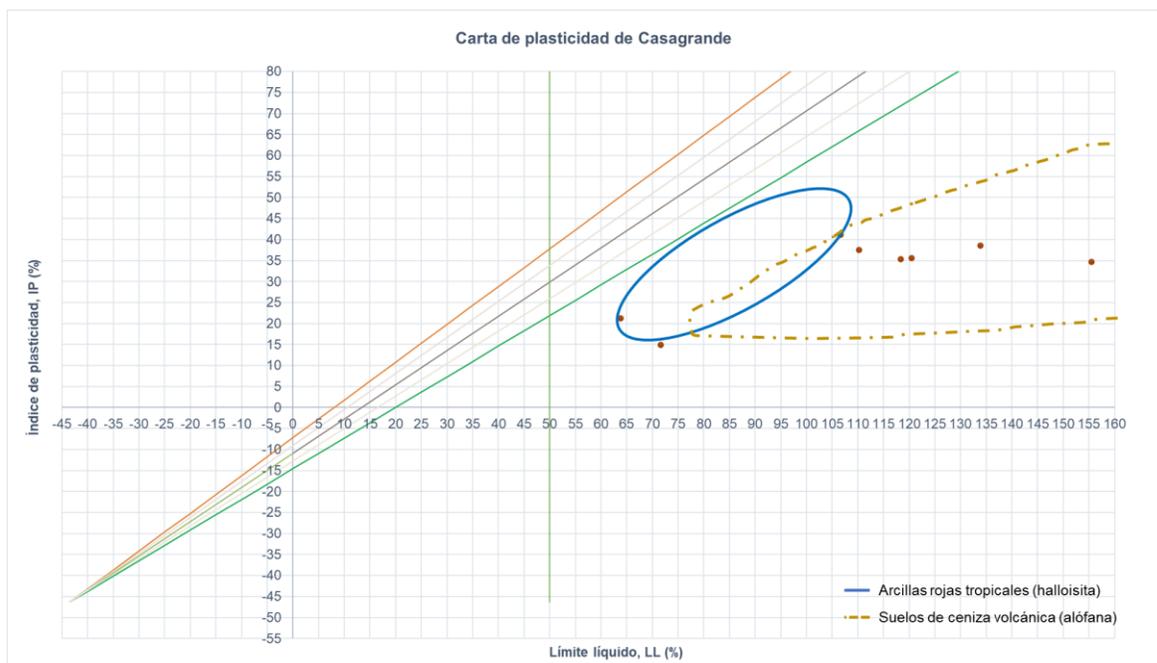
**Figura A3- 20.** Gráfico de dispersión de las muestras entre quince y veintiún metros para Índice de Plasticidad (%) vs.  $Q_u$  ( $\text{KN/m}^2$ ).

Al ubicar las muestras en la carta de plasticidad de Casagrande modificada por Mitchell (1976) (Figura A3- 21) y por Wesley (1973, 2010) (Figura A3- 22), se observa que,

respectivamente, solo se halla un punto dentro del área de las halloisitas, y la mayoría son ubicados en la región de ceniza volcánica con minerales de alófana.



**Figura A3- 21.** Carta de plasticidad de Casagrande modificada por Mitchell (1976), en la cual se localizan las muestras de quine a veintiún metros de profundidad.



**Figura A3- 22.** Carta de plasticidad de Casagrande modificada por Wesley (1973, 2010), en la cual se localizan las muestras de quince a veintiún metros de profundidad.

## **Anexo 4 – Gráficas de dispersión y cálculo de correlación lineal por barrio**

Se presentan las gráficas de dispersión para los barrios que integran las zonas urbanas evaluadas, con el cálculo de la correspondiente correlación lineal entre la razón de resistencia al corte sin drenaje  $\frac{c_u}{\sigma'_v}$  y el Índice de Plasticidad.



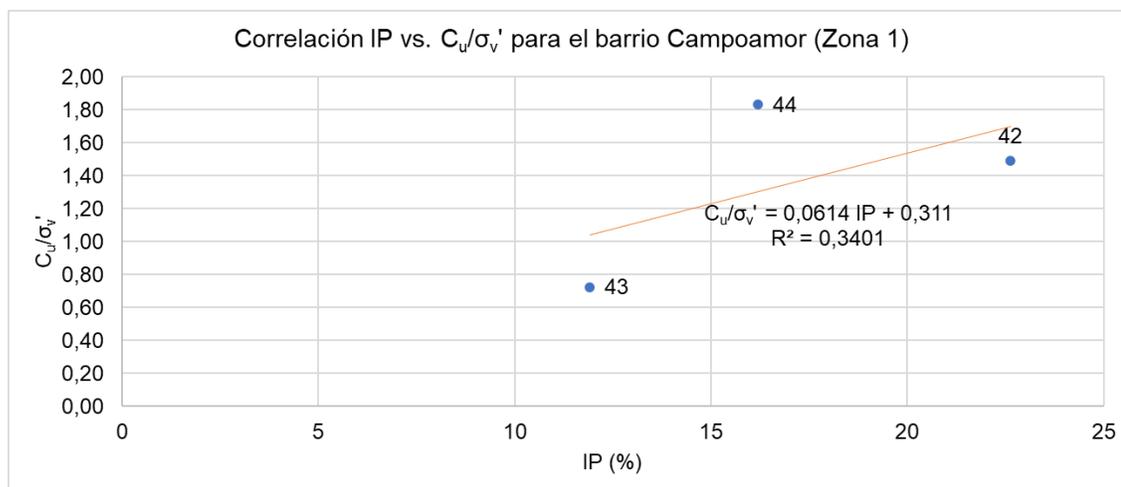
Zona	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Barrios	2	3	3	2	3	3	4	5	5	7	6	5
Puntos	9	17	6	7	8	15	18	34	26	36	26	62
39.												0,83
40.												0,64
41.												0,55
42.												0,38
43.												0,23
44.												0,47
45.												0,35
46.												0,26
47.												0,21
48.												0,29
49.												0,69
50.												0,55
51.												1,05
52.												0,81
53.												0,56
54.												1,23
55.												0,53
56.												0,35
57.												1,09
58.												0,86
59.												0,78
60.												1,04
61.												0,54
62.												0,68

\* Ha sido destacado con un color determinado cada conjunto de datos correspondiente a cada uno de los barrios que integran cada zona

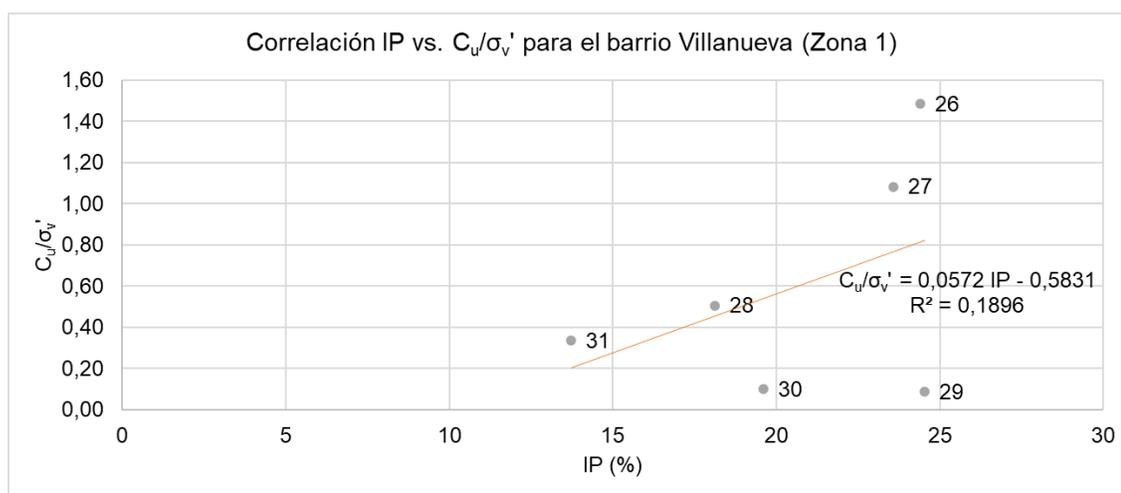
**Tabla A4- 2.** Resumen del rango de valores en que cae la razón de resistencia al corte sin drenaje ( $C_u/\sigma_v'$ ) y valor promedio (entre paréntesis)

ZONA	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10
1	0,72-1,83 (1,35)	0,09-1,49 (0,615)								
2	0,38-0,53 (0,425)	0,22 (0,22)	0,17-0,63 (0,384)							
3	0,43-1,5 (1,11)	0,48 (0,48)	0,08 (0,08)							
4	0,12-0,55 (0,335)	0,59-1,57 (0,928)								
5	0,05 (0,05)	0,32-0,92 (0,575)	0,3-0,54 (0,447)							
6	0,21-0,81 (0,464)	0,68-1,22 (0,917)	0,22-0,33 (0,274)							
7	0,56-2,81 (1,403)	0,54-1,38 (0,815)	0,14-1,22 (0,481)	0,60-1,2 (0,97)						
8	0,31-2,12 (0,695)	0,15-0,46 (0,335)	0,49-2,10 (0,867)	0,27-1,55 (0,613)	0,18-1,54 (0,78)					
9	0,26-1,75 (0,545)	0,34 (0,34)	0,12-0,48 (0,207)	0,52-2,18 (1,41)	0,48-0,78 (0,633)					
10	1,16-1,63 (1,33)	0,21-1,39 (0,58)	0,16-0,71 (0,363)	1,02 (1,02)	0,16-0,6 (0,328)	0,38-0,69 (0,347)	0,47-1,91 (1,25)			
11	0,32-1,58 (1,05)	0,49 (0,49)	0,4-0,89 (0,544)	0,21-0,41 (0,32)	0,35-1,75 (0,983)	0,61-1,15 (0,88)				
12	0,16-1,78 (0,727)	0,36-0,36 (0,36)	0,54-2,51 (1,56)	0,16-1,36 (0,565)	0,21-0,87 (0,486)	0,29-0,69 (0,51)	0,53-1,23 (0,836)	0,35 (0,35)	0,78- 1,09 (0,91)	0,54- 1,04 (0,753)

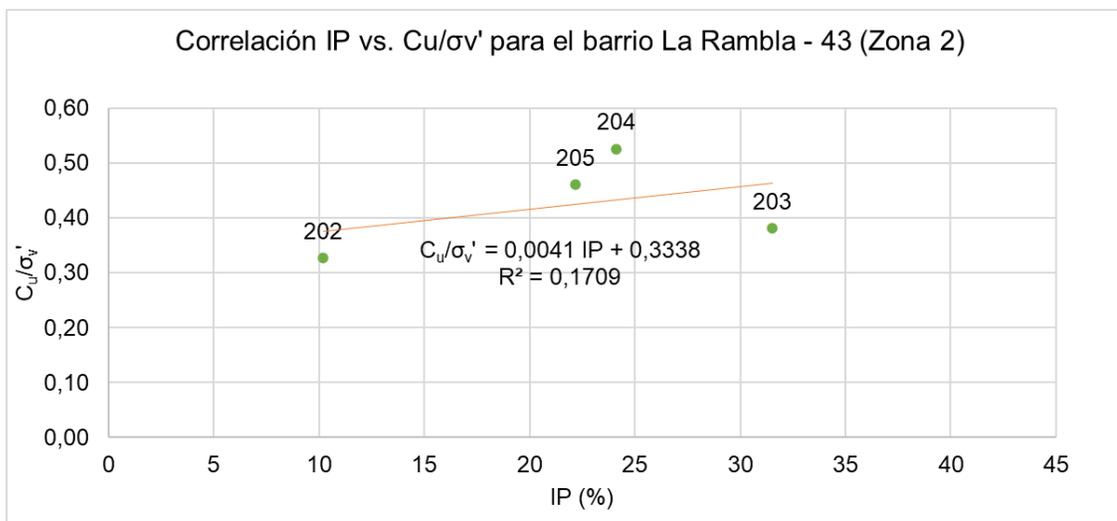
En el plano cartesiano  $C_u/\sigma_v'$  (ordenada) vs IP (abscisas) se posicionaron los puntos, creando el gráfico de dispersión para cada barrio, cuyas gráficas se presentan desde la Figura A4- 1 a la Figura A4- 44.



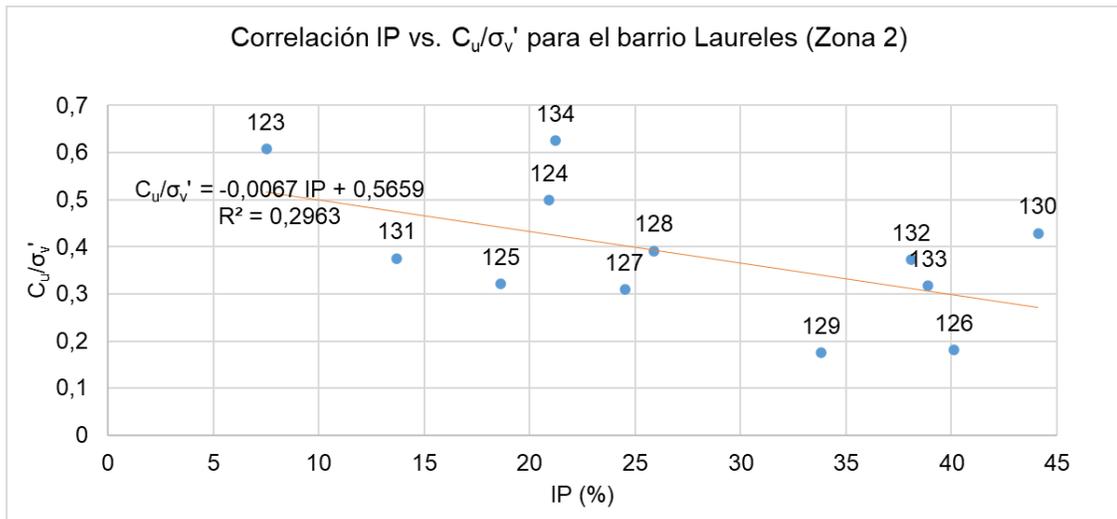
**Figura A4- 1.** Correlación IP vs.  $C_u/\sigma_v'$  para el barrio Campoamor (Zona 1).



**Figura A4- 2.** Correlación IP vs.  $C_u/\sigma_v'$  para el barrio Villanueva (Zona 1).



**Figura A4- 3.** Correlación IP vs.  $C_u/\sigma_v'$  para el barrio La Rambla – 43 (Zona 2).



**Figura A4- 4.** Correlación IP vs.  $C_u/\sigma_v'$  para el barrio Laureles (Zona 2).

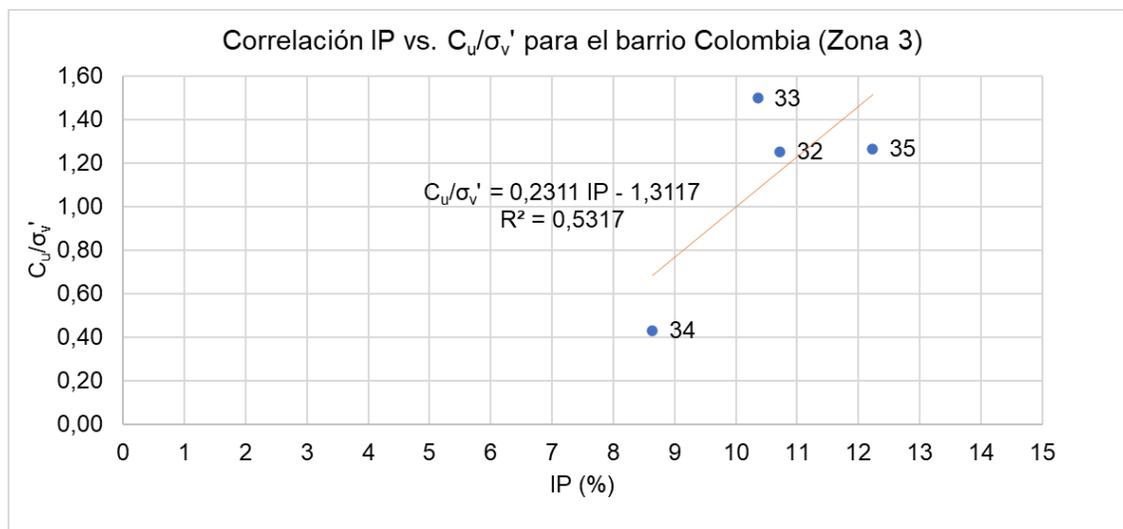


Figura A4- 5. Correlación IP vs.  $C_u/\sigma_v'$  para el barrio Colombia (Zona 3).

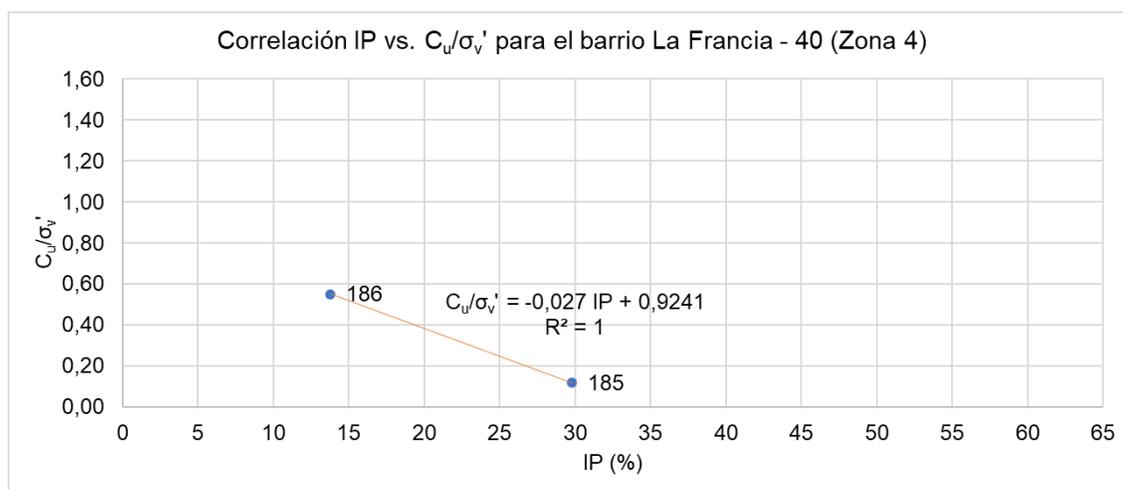


Figura A4- 6. Correlación IP vs.  $C_u/\sigma_v'$  para el barrio La Francia - 40 (Zona 4).

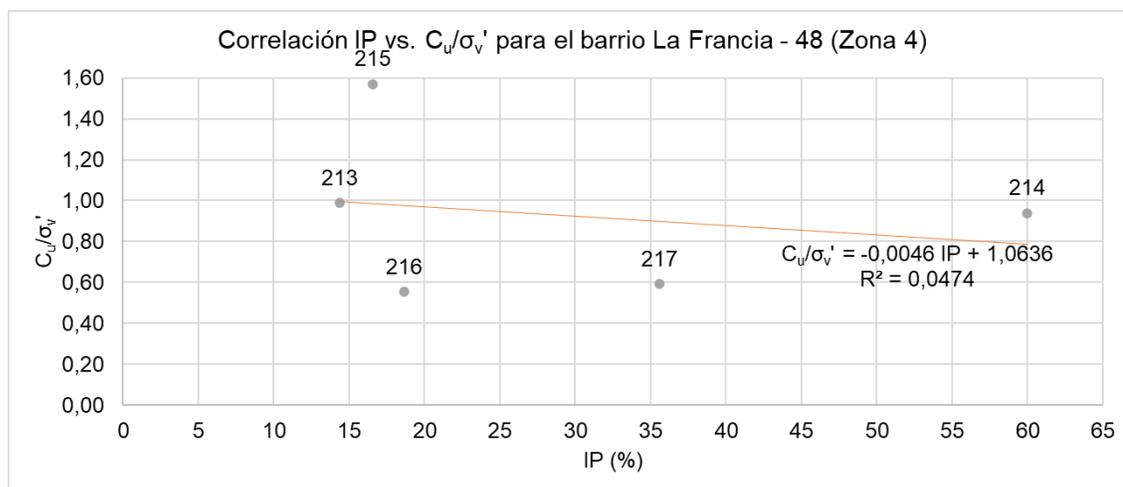


Figura A4- 7. Correlación IP vs.  $C_u/\sigma_v'$  para el barrio La Francia - 48 (Zona 4).

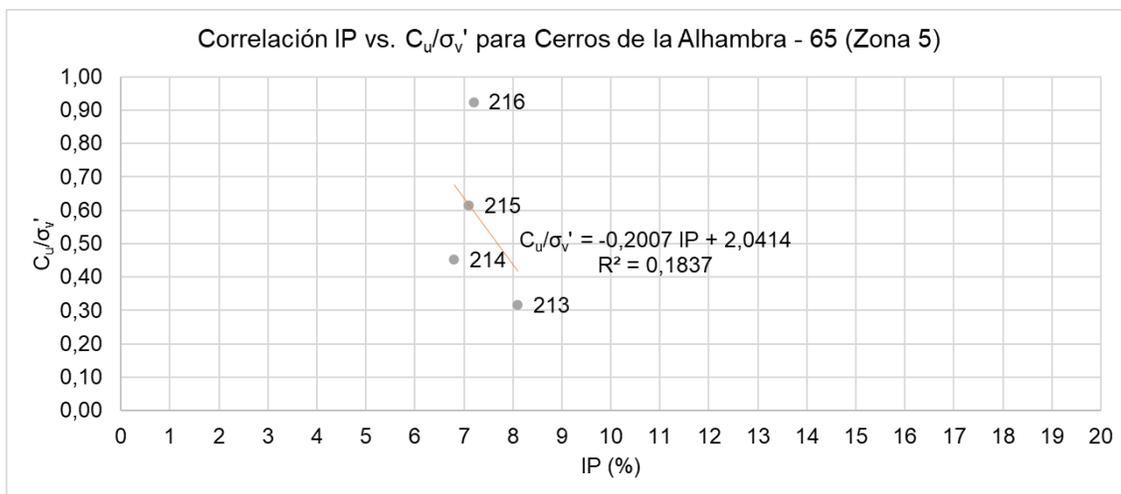


Figura A4- 8. Correlación IP vs.  $C_u/\sigma_v'$  para el Cerros de la Alhambra - 65 (Zona 5).

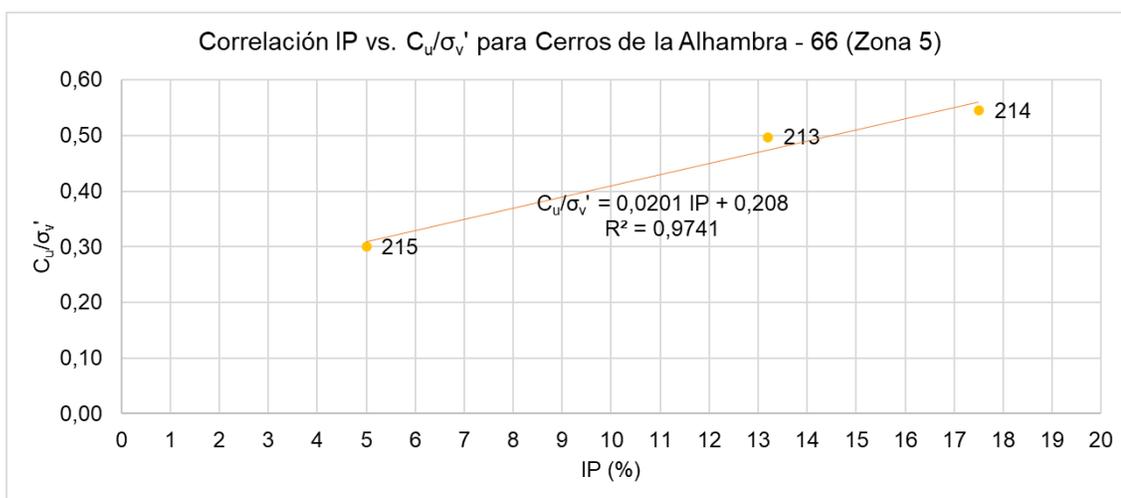


Figura A4- 9. Correlación IP vs.  $C_u/\sigma_v'$  para el Cerros de la Alhambra - 66 (Zona 5).

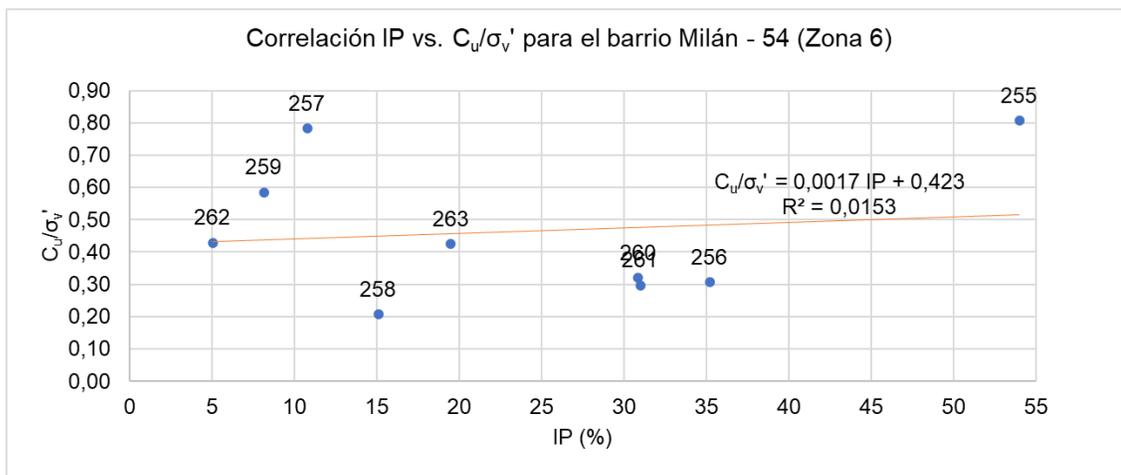


Figura A4- 10. Correlación IP vs.  $C_u/\sigma_v'$  para el barrio Milán - 54 (Zona 6).

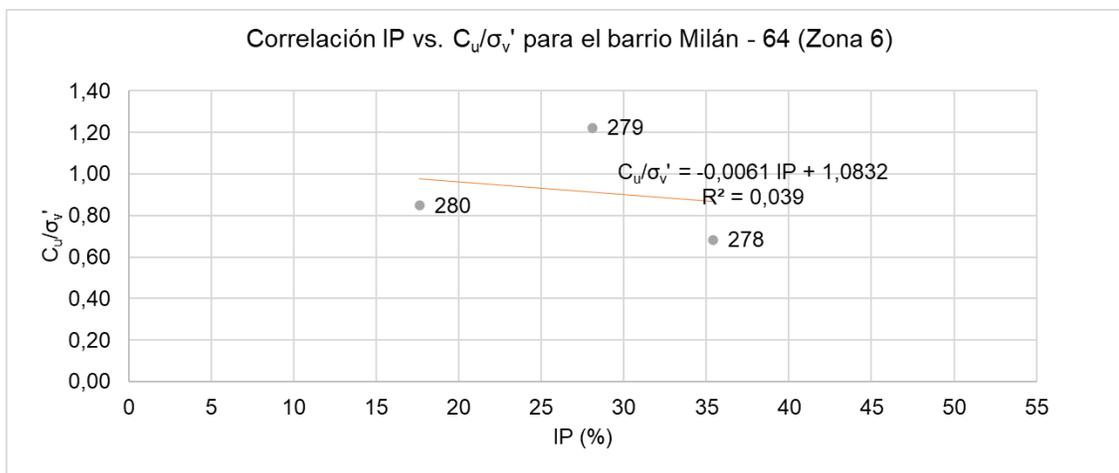


Figura A4- 11. Correlación IP vs.  $C_u/\sigma_v'$  para el barrio Milán - 64 (Zona 6).

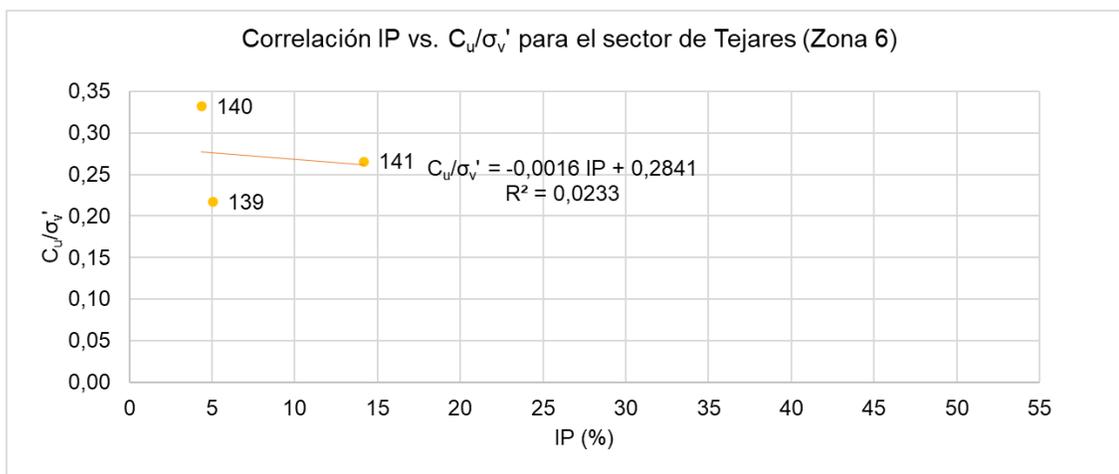


Figura A4- 12. Correlación IP vs.  $C_u/\sigma_v'$  para el sector de Tejares (Zona 6).

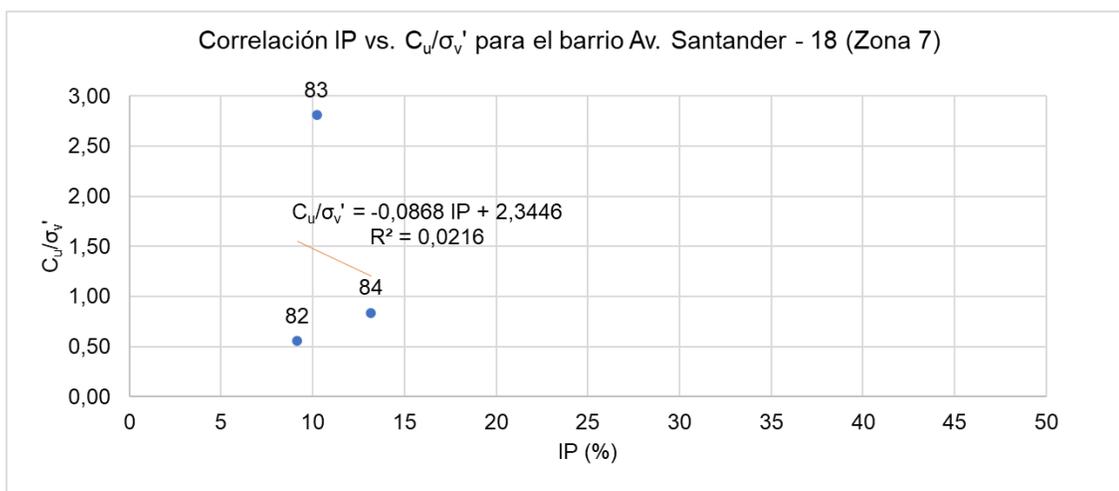


Figura A4- 13. Correlación IP vs.  $C_u/\sigma_v'$  para la Av. Santander - 18 (Zona 7).

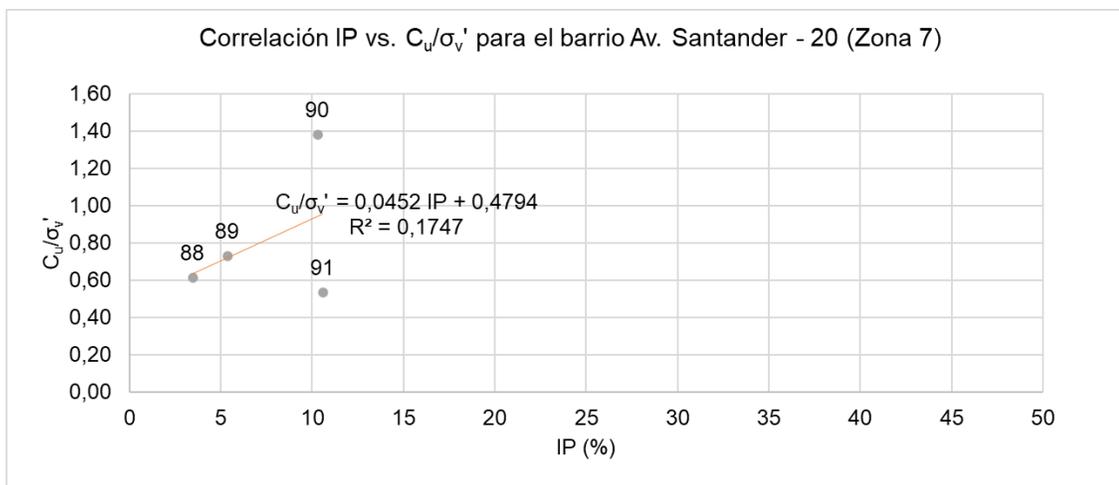


Figura A4- 14. Correlación IP vs.  $C_u/\sigma_v'$  para la Av. Santander - 20 (Zona 7).

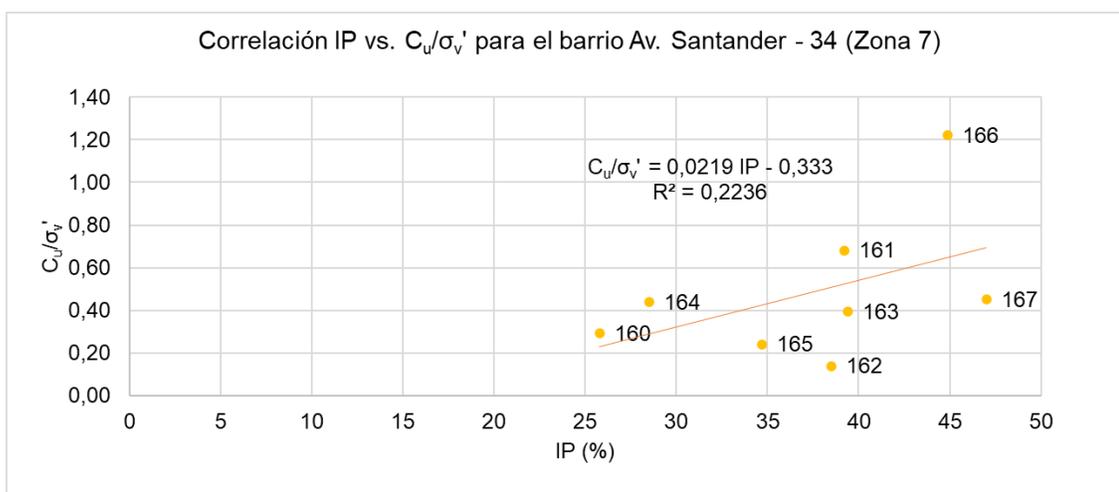


Figura A4- 15. Correlación IP vs.  $C_u/\sigma_v'$  para la Av. Santander - 34 (Zona 7).

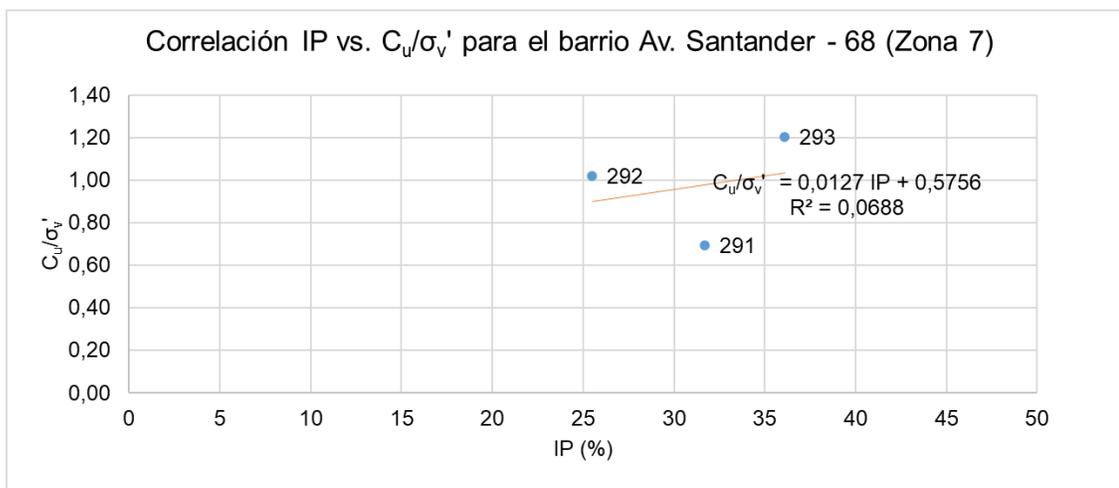


Figura A4- 16. Correlación IP vs.  $C_u/\sigma_v'$  para la Av. Santander - 68 (Zona 7).

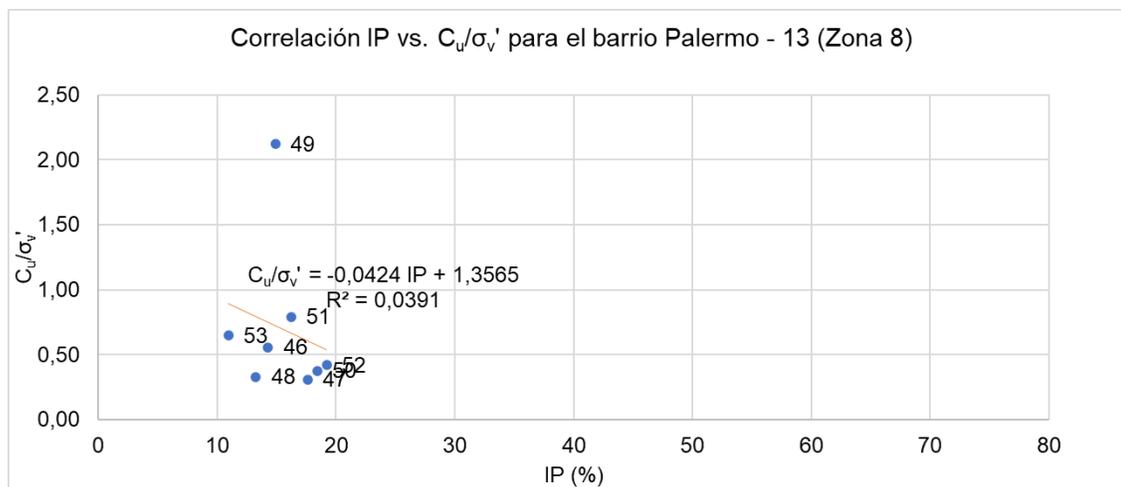


Figura A4- 17. Correlación IP vs.  $C_u/\sigma_v'$  para el barrio Palermo -13 (Zona 8).

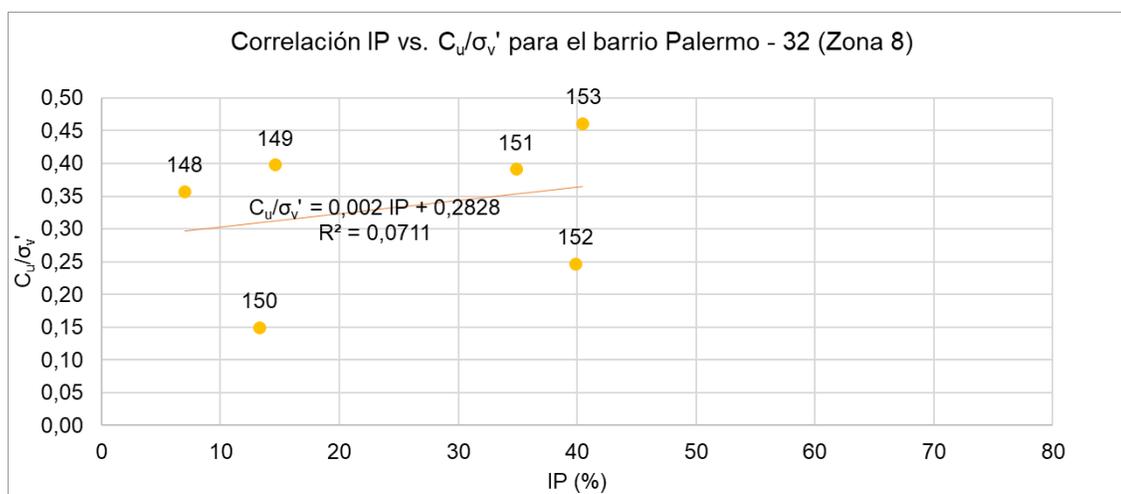


Figura A4- 18. Correlación IP vs.  $C_u/\sigma_v'$  para el barrio Palermo -32 (Zona 8).

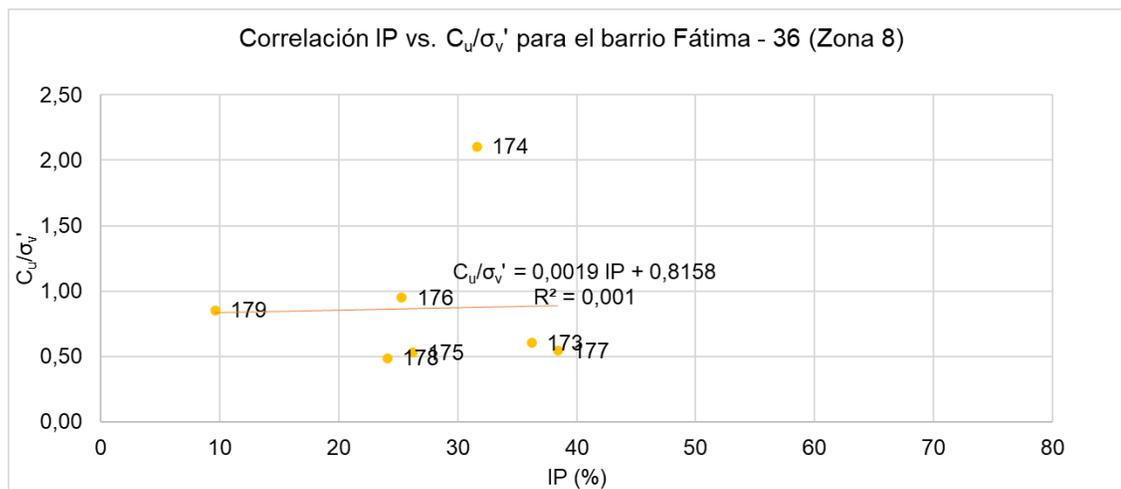


Figura A4- 19. Correlación IP vs.  $C_u/\sigma_v'$  para el barrio Fátima -36 (Zona 8).

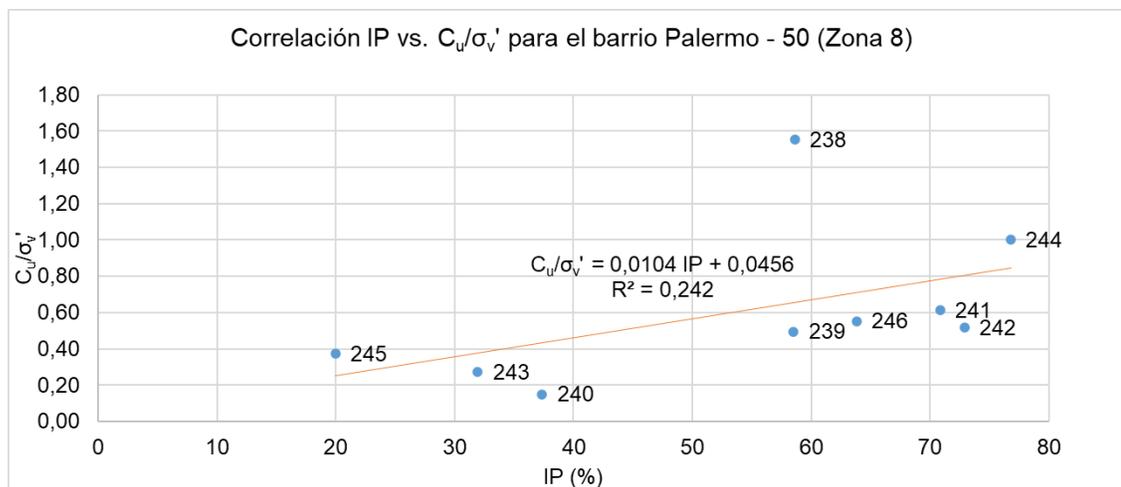


Figura A4- 20. Correlación IP vs.  $C_u/\sigma_v'$  para el barrio Palermo -50 (Zona 8).

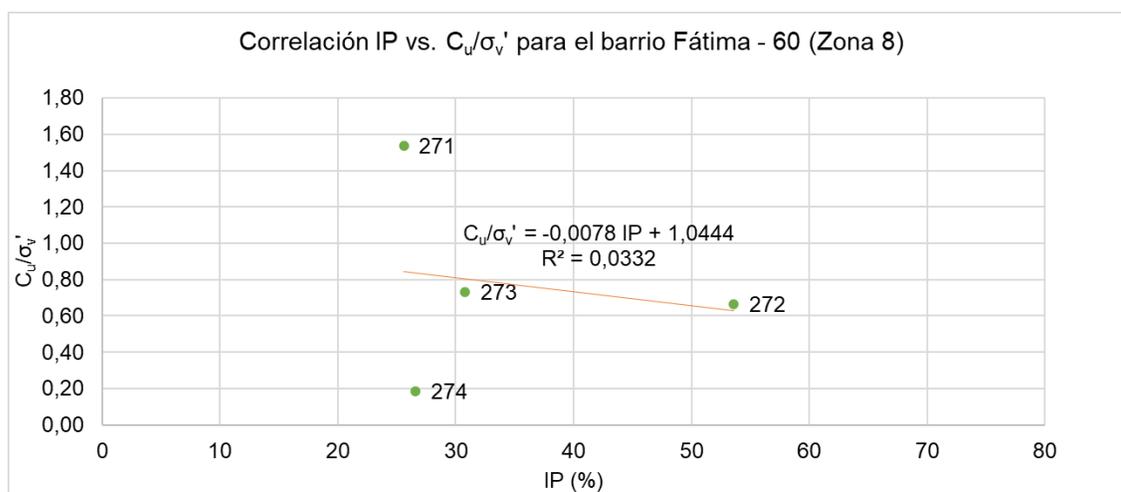


Figura A4- 21. Correlación IP vs.  $C_u/\sigma_v'$  para el barrio Fátima -60 (Zona 8).

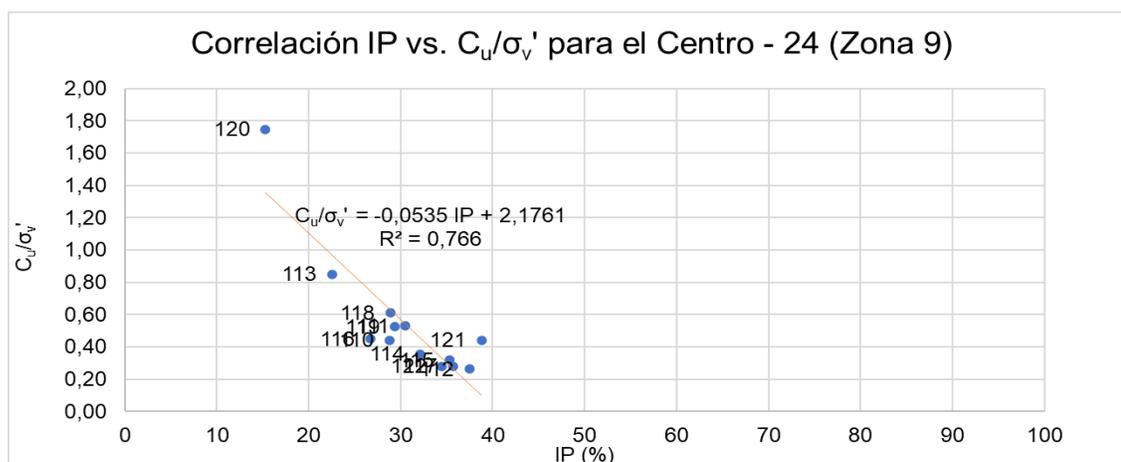
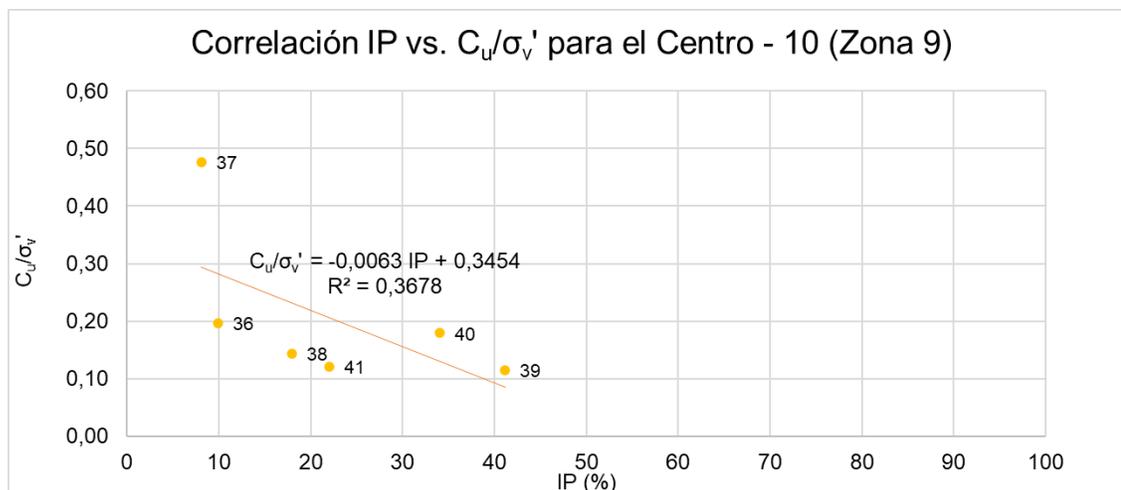
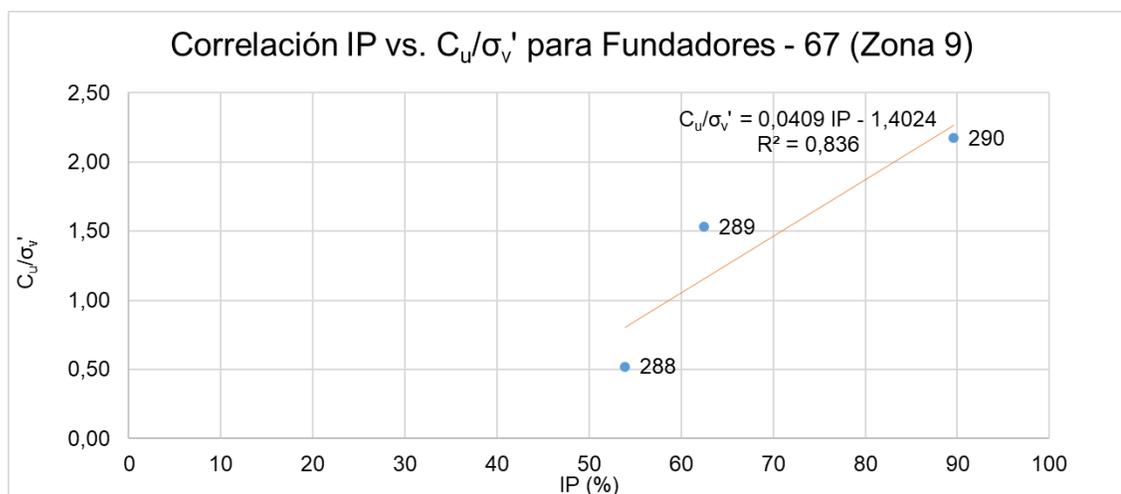


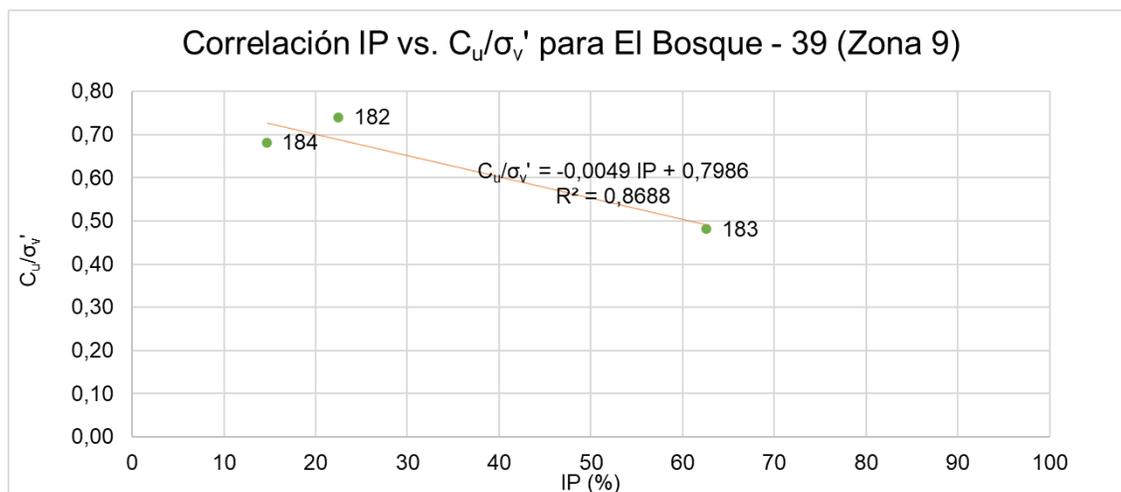
Figura A4- 22. Correlación IP vs.  $C_u/\sigma_v'$  para el Centro - 24 (Zona 9).



**Figura A4- 23.** Correlación IP vs.  $C_u/\sigma_v'$  para el Centro - 10 (Zona 9).



**Figura A4- 24.** Correlación IP vs.  $C_u/\sigma_v'$  para Fundadores - 67 (Zona 9).



**Figura A4- 25.** Correlación IP vs.  $C_u/\sigma_v'$  para El Bosque - 39 (Zona 9).

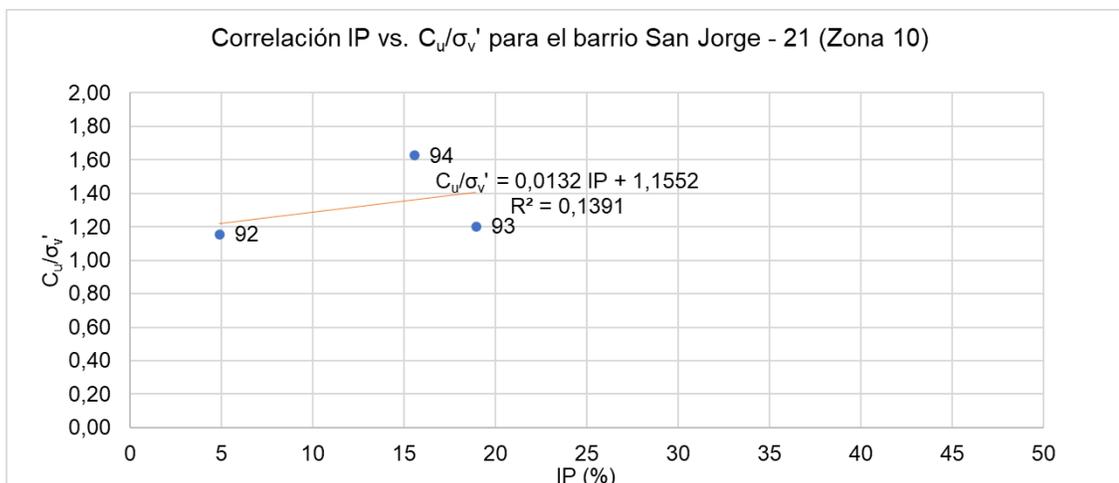


Figura A4- 26. Correlación IP vs.  $C_u/\sigma_v'$  para el barrio San Jorge - 21 (Zona 10).

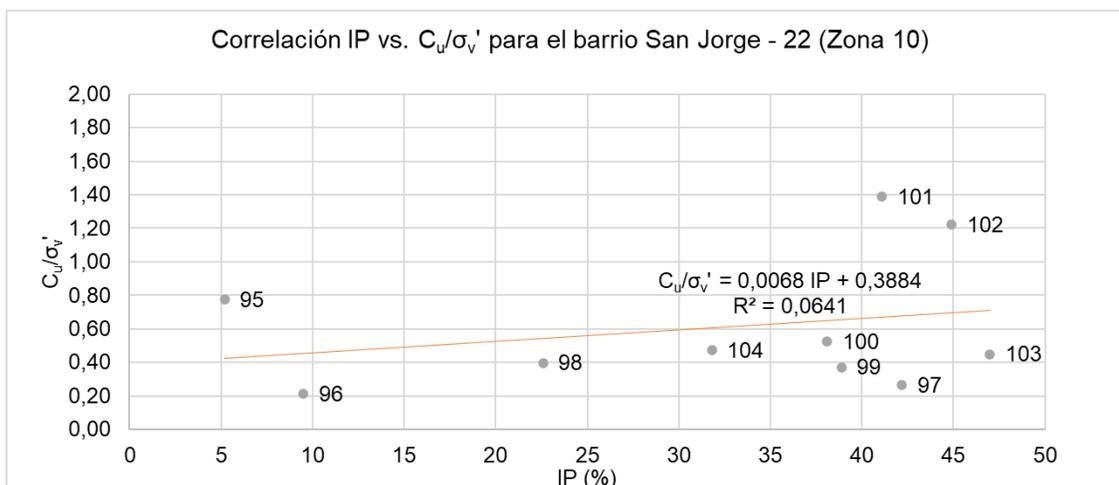


Figura A4- 27. Correlación IP vs.  $C_u/\sigma_v'$  para el barrio San Jorge - 22 (Zona 10).

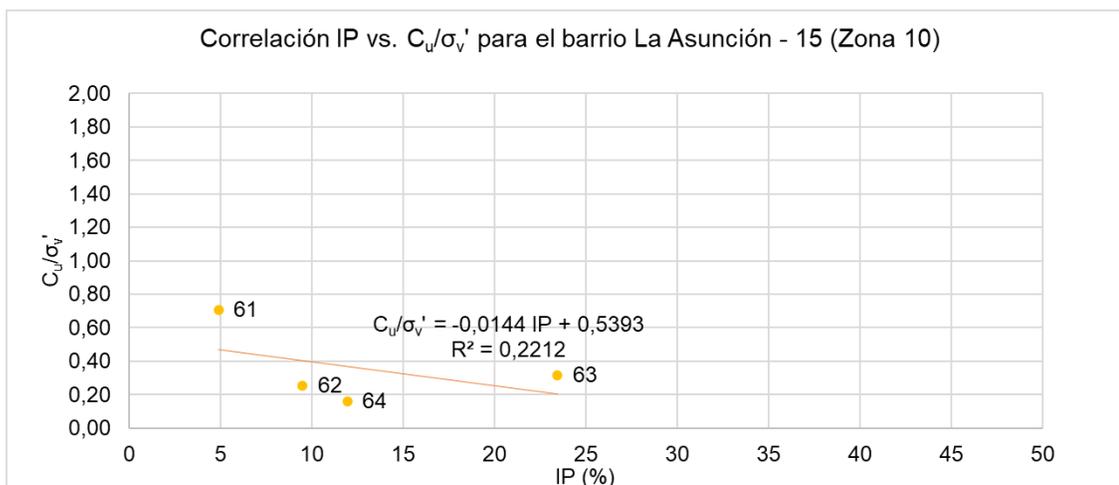


Figura A4- 28. Correlación IP vs.  $C_u/\sigma_v'$  para el barrio La Asunción - 15 (Zona 10).

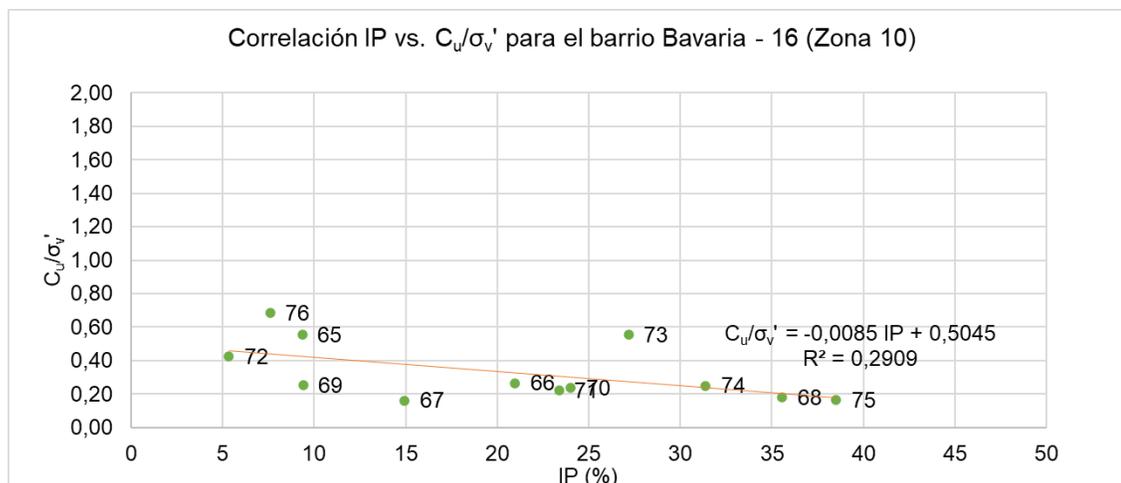


Figura A4- 29. Correlación IP vs.  $C_u/\sigma_v'$  para el barrio Bavaria - 16 (Zona 10).

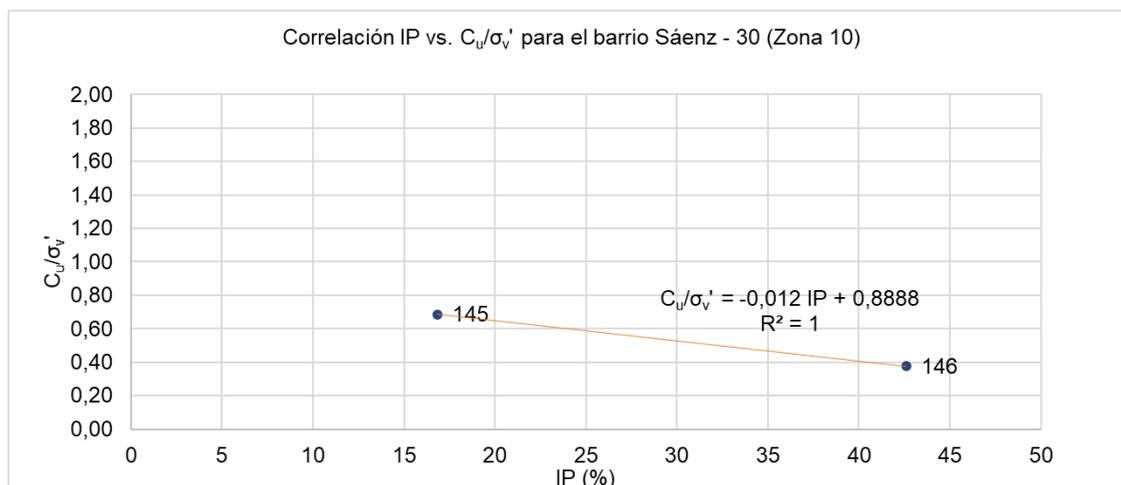


Figura A4- 30. Correlación IP vs.  $C_u/\sigma_v'$  para el barrio Sáenz - 30 (Zona 10).

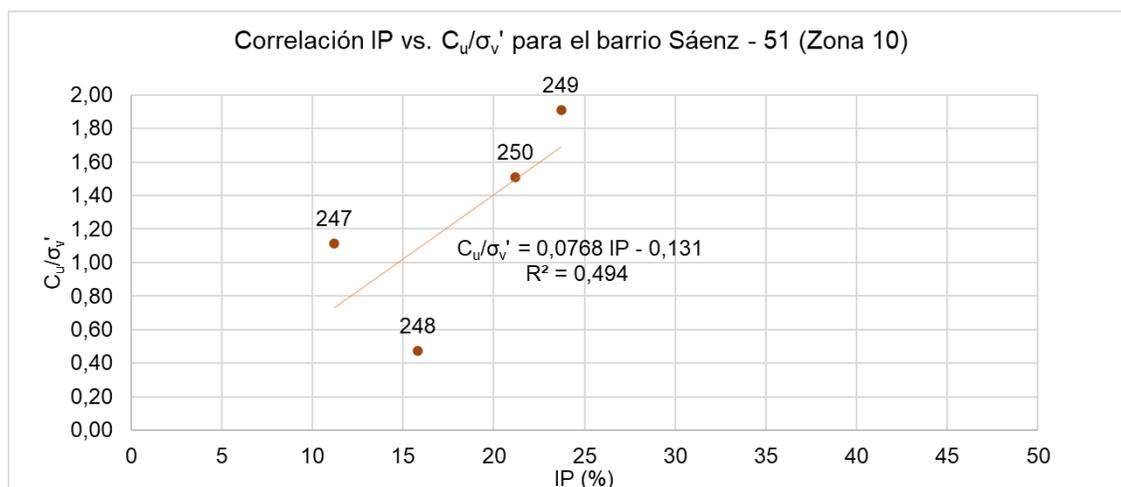


Figura A4- 31. Correlación IP vs.  $C_u/\sigma_v'$  para el barrio Sáenz - 51 (Zona 10).

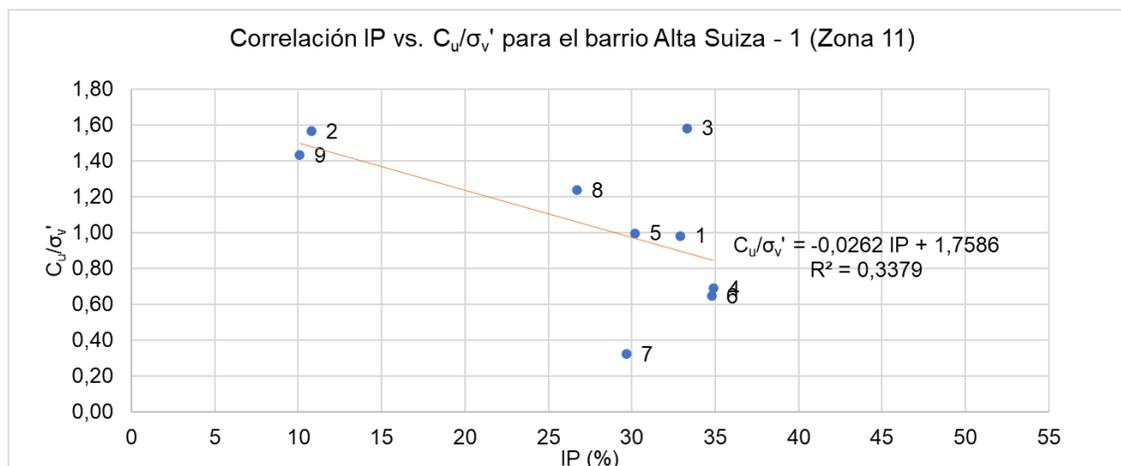


Figura A4- 32. Correlación IP vs.  $C_u/\sigma_v'$  para el Alta Suiza - 1 (Zona 11).

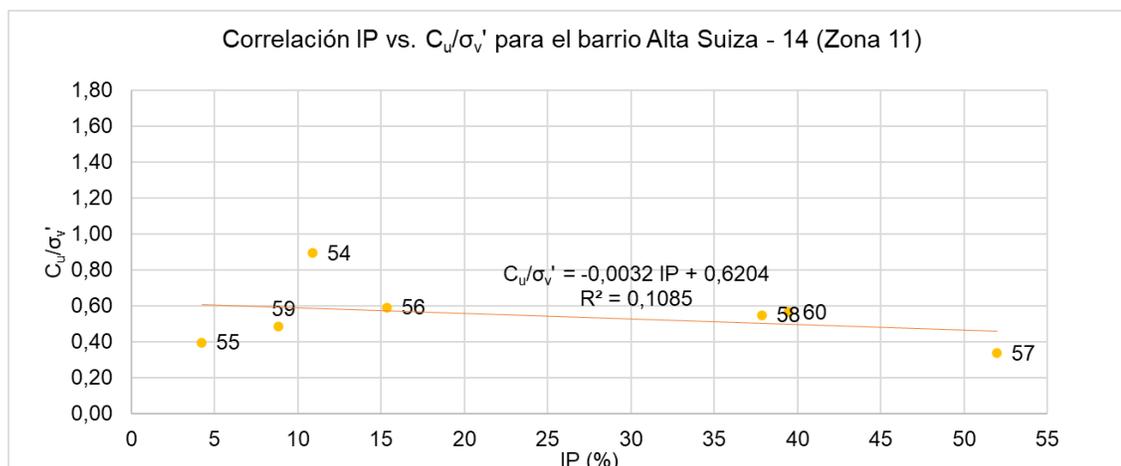


Figura A4- 33. Correlación IP vs.  $C_u/\sigma_v'$  para el Alta Suiza - 14 (Zona 11).

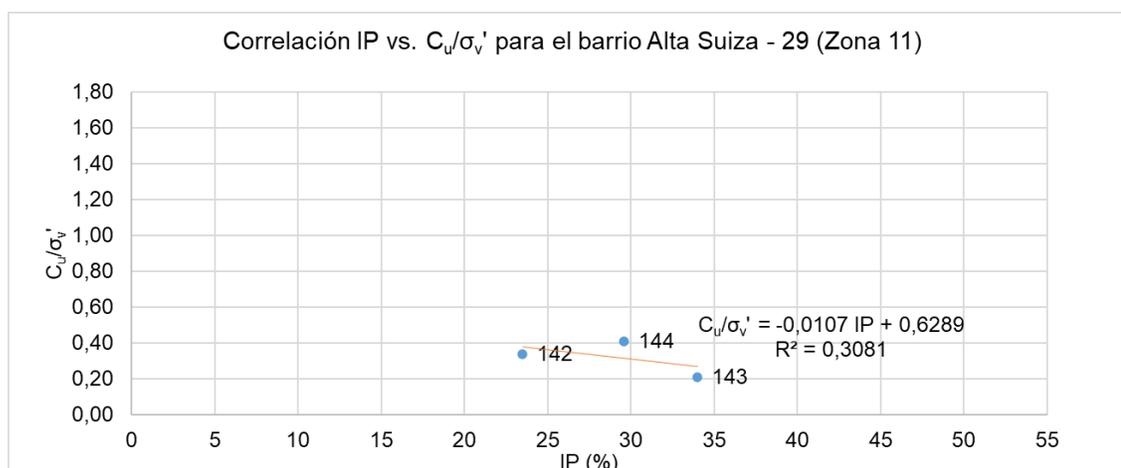


Figura A4- 34. Correlación IP vs.  $C_u/\sigma_v'$  para el Alta Suiza - 29 (Zona 11).

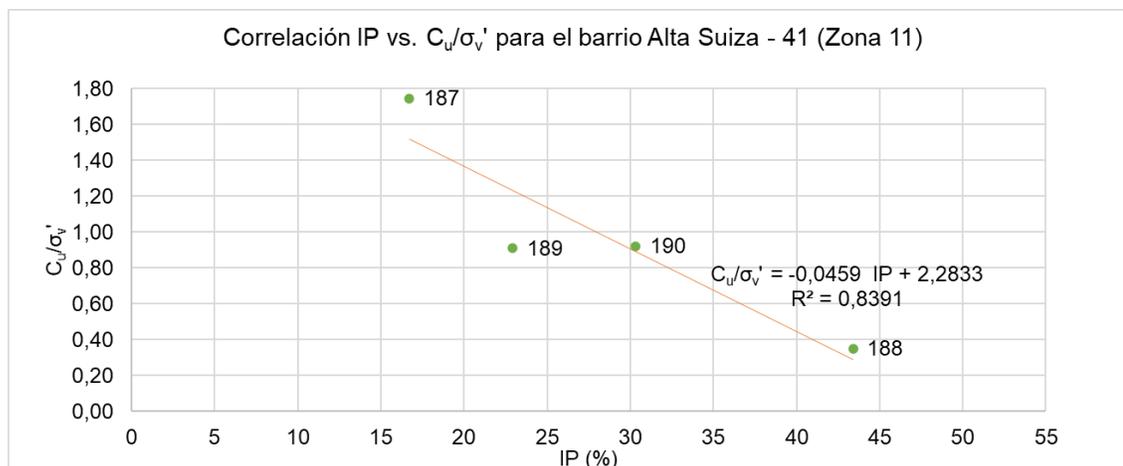


Figura A4- 35. Correlación IP vs.  $C_u/\sigma_v'$  para el Alta Suiza - 41 (Zona 11).

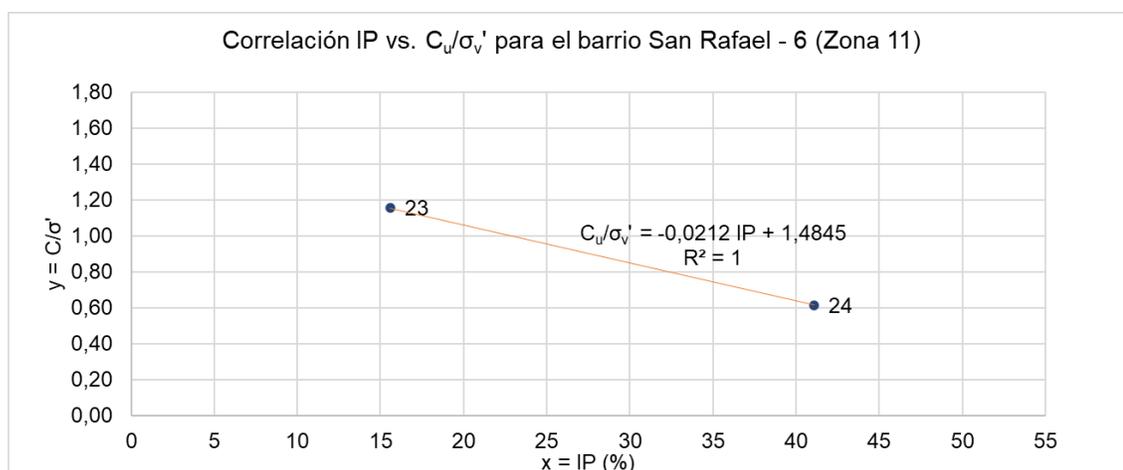


Figura A4- 36. Correlación IP vs.  $C_u/\sigma_v'$  para San Rafael - 6 (Zona 11).

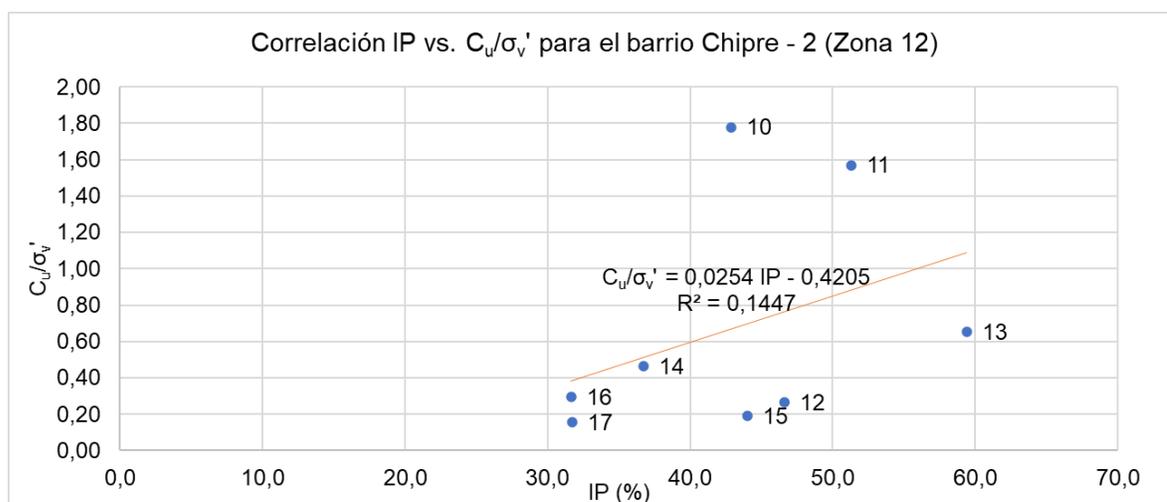


Figura A4- 37. Correlación IP vs.  $C_u/\sigma_v'$  para el barrio Chipre - 2 (Zona 12).

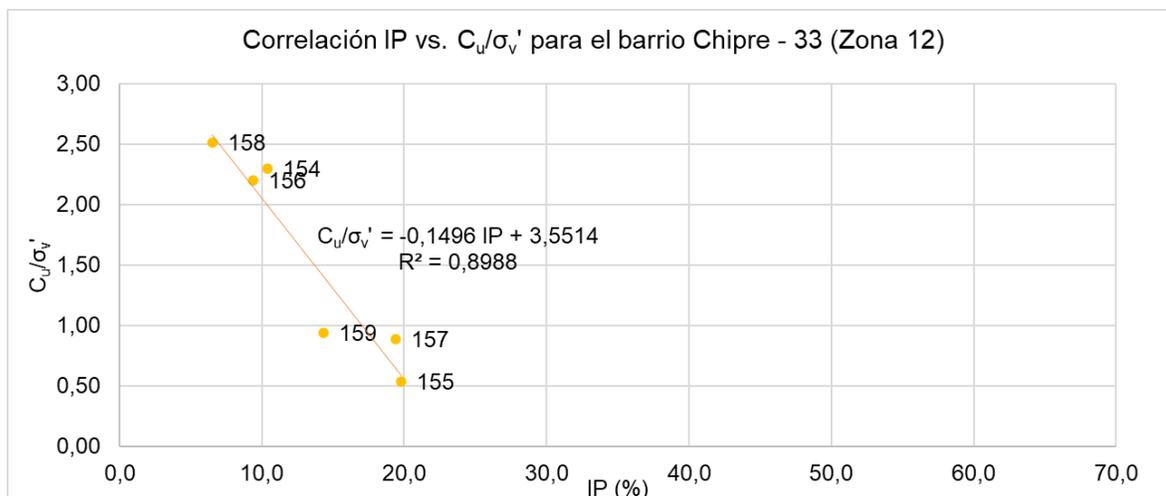


Figura A4- 38. Correlación IP vs.  $C_u/\sigma_v'$  para el barrio Chipre - 33 (Zona 12).

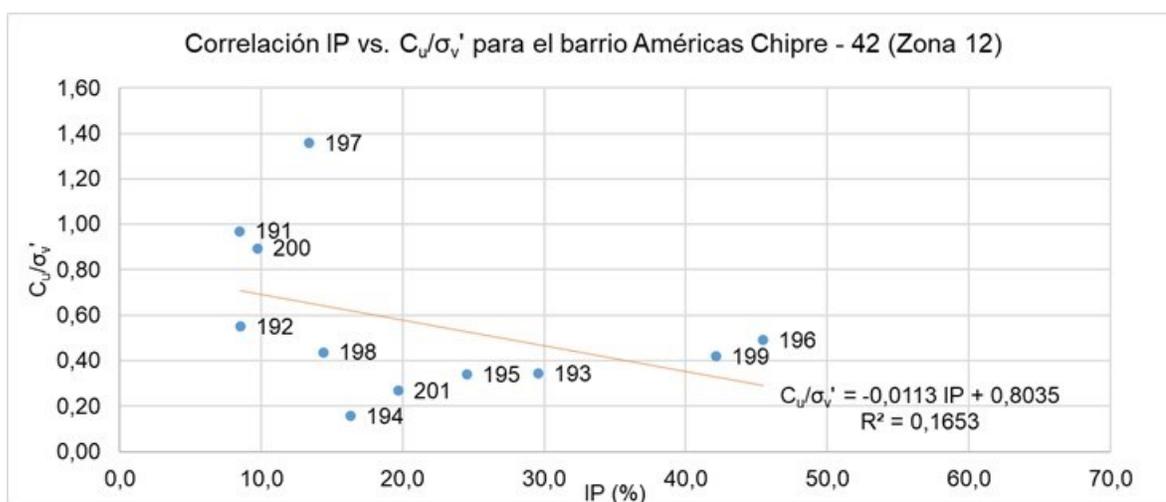


Figura A4- 39. Correlación IP vs.  $C_u/\sigma_v'$  para el barrio Américas / Chipre - 42 (Zona 12).

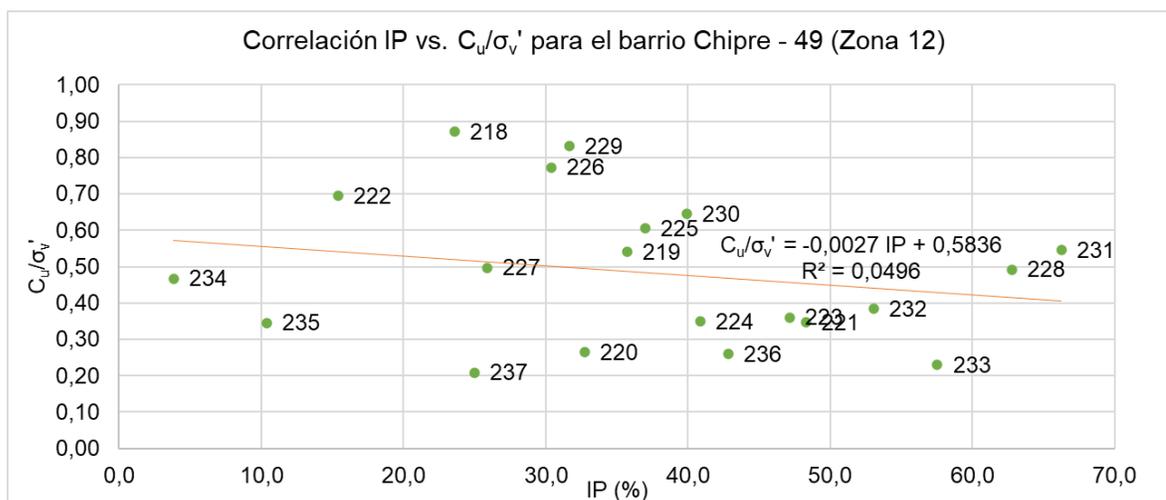


Figura A4- 40. Correlación IP vs.  $C_u/\sigma_v'$  para el barrio Chipre - 49 (Zona 12).

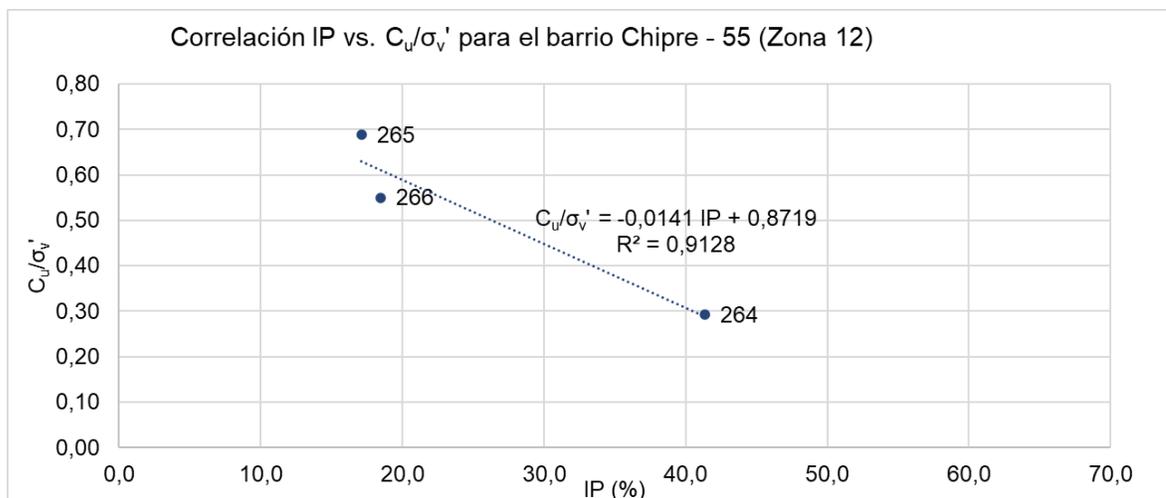


Figura A4- 41. Correlación IP vs.  $C_u/\sigma_v'$  para el barrio Chipre - 55 (Zona 12).

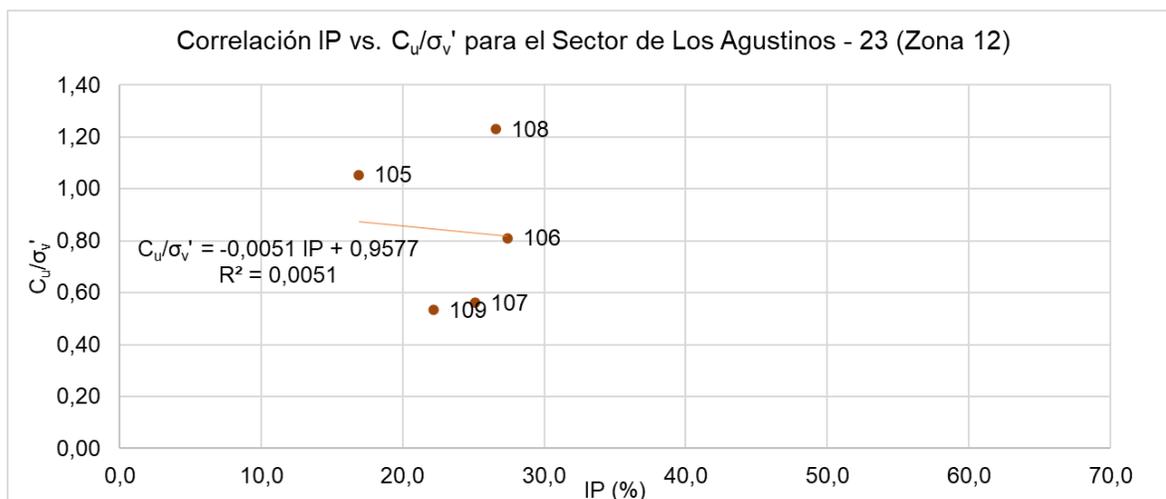


Figura A4- 42. Correlación IP vs.  $C_u/\sigma_v'$  para el sector de Los Agustinos - 23 (Zona 12).

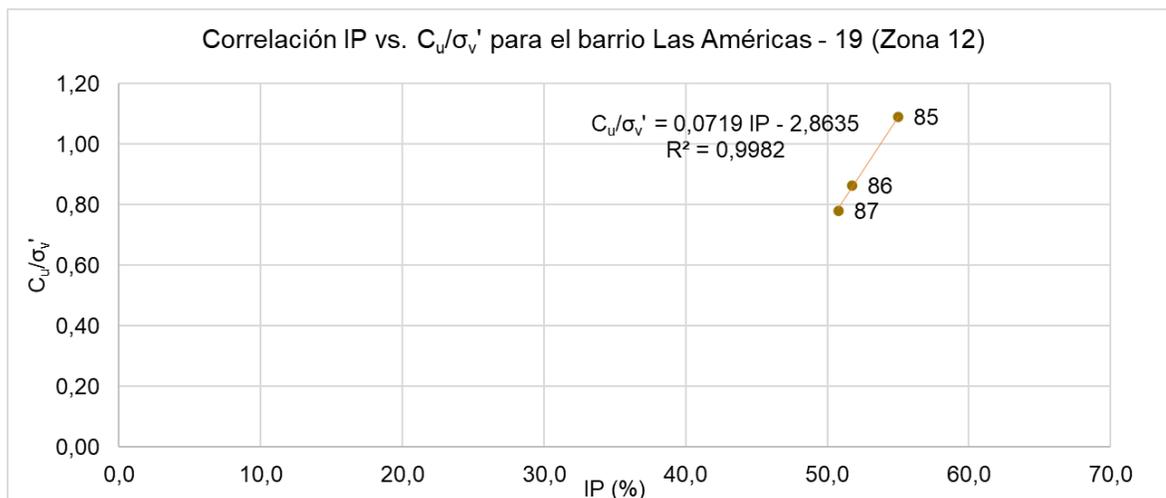
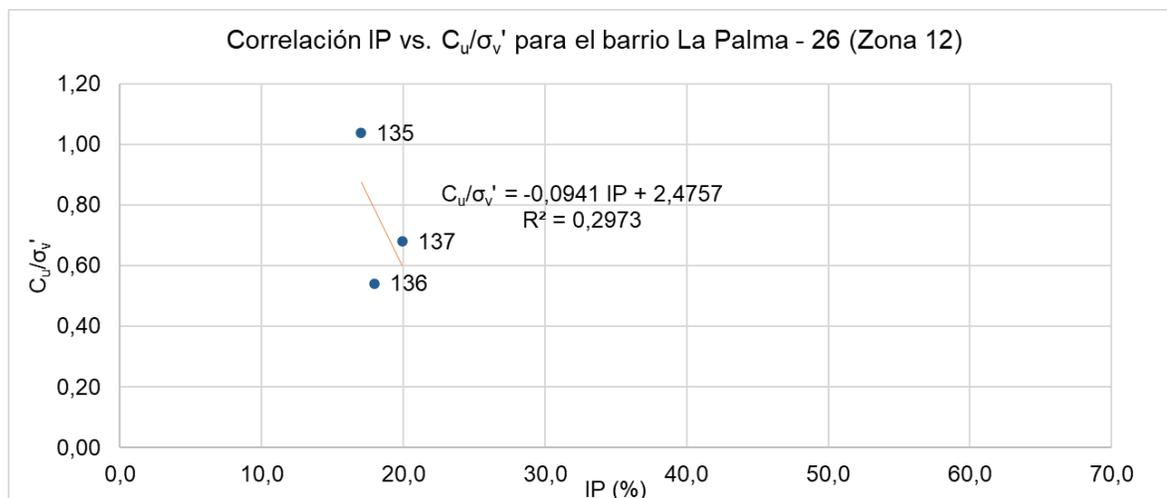


Figura A4- 43. Correlación IP vs.  $C_u/\sigma_v'$  para el barrio Las Américas - 19 (Zona 12).



**Figura A4- 44.** Correlación IP vs.  $C_u/\sigma_v'$  para el barrio La Palma - 26 (Zona 12).

La Tabla A4- 3 presenta, por zona y barrio, la ecuación de dependencia existente entre la resistencia al corte sin drenaje ( $C_u/\sigma_v'$ ) como función del Índice de Plasticidad, para muestras de suelo volcánico procedentes de distintas zonas de la ciudad de Manizales. Se destaca el grado de resolución o ajuste que tiene cada correlación y se adiciona una columna descriptiva del valor  $R^2$ .

**Tabla A4- 3.** Ecuación de dependencia existente entre la resistencia al corte sin drenaje ( $C_u/\sigma_v'$ ) como función del Índice de Plasticidad por cada barrio.

ZONA	Barrios	Rango (Promedio) $\frac{C_u}{\sigma_v'}$	IP	Ecuación $\frac{C_u}{\sigma_v'} = f(IP)$	$R^2$	Descripción
ZONA 1	Campoamor	0.72-1.83 (1.35)	11.92- 22.63 (16.91)	$\frac{C_u}{\sigma_v'} = 0,0614 IP + 0,311$	0,3401	Baja
	Villanueva	0.09-1.49 (0.615)	13.72- 24.54 (20.66)	$\frac{C_u}{\sigma_v'} = 0,0572IP - 0,5831$	0,1896	Muy baja
ZONA 2	La Rambla-43	0.38-0.53 (0.425)	10.12- 31.5 (21.98)	$\frac{C_u}{\sigma_v'} = 0,0041IP + 0,3338$	0.1709	Muy Baja
	La Rambla-62	0.22	21.7			(i)
ZONA 3	Laureles	0.17-0.63 (0.384)	7.5- 40.1 (22.92)	$\frac{C_u}{\sigma_v'} = -0,0067P + 0,5659$	0.2963	Baja
	Colombia	0.43-1.5 (1.11)	8.6- 12.2 (10.48)	$\frac{C_u}{\sigma_v'} = 0,2311IP - 1,3117$	0.5317	Media

	Versalles	0.48 (0.48)	11 (11)			
	Belén	0.08 (0.08)	8.11 (8.11)			
ZONA 4	La Francia 40	0.12-0.55 (0.335)	13.8- 29.8 (21.8)	$\frac{C_u}{\sigma'_v}$ = -0,027 IP - 0,9241	1	Muy alta
	La Francia 48	0.59-1.57 (0.928)	16.6- 60 (32.7)	$\frac{C_u}{\sigma'_v}$ = -0,0046IP + 1,0636	0,0474	Muy baja
ZONA 5	Conjunto cerrado Valles de la Alhambra	0.05 (0.05)	6.8 (6.8)			
	Cerros de la Alhambra 65	0.32-0.92 (0.575)	6.8-8.1 (7.3)	$\frac{C_u}{\sigma'_v}$ = -0,2007IP + 2,0414	0.1837	Muy baja
	Cerros de la Alhambra 66	0.3-0.54 (0.447)	5-17.5 (11.9)	$\frac{C_u}{\sigma'_v}$ = 0,0201IP - 0,208	0,9741	Muy alta
ZONA 6	Milán 54	0.21-0.81 (0.464)	5.1-54 (23.3)	$\frac{C_u}{\sigma'_v}$ = 0,0017IP + 0,423	0.0153	Muy Baja
	Milán 64	0.68-1.22 (0.917)	17.6- 35.4 (27)	$\frac{C_u}{\sigma'_v}$ = -0,0061IP + 1,0832	0.039	Muy Baja
	Sector de Tejares	0.22-0.33 (0.274)	4.4- 14.2 (7.9)	$\frac{C_u}{\sigma'_v}$ = -0,0016IP + 0,2841	0.0233	Muy Baja
ZONA 7	Av. Santander 18	0.56-2.81 (1.403)	9.2- 13.2 (10.9)	$\frac{C_u}{\sigma'_v}$ = -0,0868IP + 2,3446	0.0216	Muy Baja
	Av. Santander 20	0.54-1.38 (0.815)	3.5- 10.6 (7.4)	$\frac{C_u}{\sigma'_v}$ = 0,0452IP + 0,4794	0.1747	Muy baja
	Av. Santander 34	0.14-1.22 (0.481)	25.8- 47 (37.3)	$\frac{C_u}{\sigma'_v}$ = 0,0219IP - 0,333	0.2236	Baja
	Av. Santander 68	0.60-1.2 (0.97)	25.5- 36.1 (31.1)	$\frac{C_u}{\sigma'_v}$ = 0,0127IP + 0,5756	0.0688	Muy Baja
ZONA 8	Palermo 13	.31-212 (0.695)	13.3- 19.2 (15.6)	$\frac{C_u}{\sigma'_v}$ = -0,0424IP + 1,3565	0.0391	Muy Baja
	Palermo 32	0.15-0.46 (0.335)	7-40.5 (15)	$\frac{C_u}{\sigma'_v}$ = 0,002IP + 0,2828	0.0711	Muy Baja
	Fátima 36	0.49-210 (0.867)	9.6- 38.4 (27.3)	$\frac{C_u}{\sigma'_v}$ = 0,0019IP + 0,8158	0.001	Muy Baja
	Palermo 50	0.27-1.55 (0.613)	20-76 (54.5)	$\frac{C_u}{\sigma'_v}$ = 0,0104IP + 0,0456	0.242	Baja
	Fátima 60	0.18-1.54 (0.78)	25.6- 53.6 (34.2)	$\frac{C_u}{\sigma'_v}$ = -0,0078IP + 1,0444	0.0332	Muy baja
ZONA 9	Centro 24	0.26-1.75 (0.545)	15.3- 38.3 (30.5)	$\frac{C_u}{\sigma'_v}$ = -0,0535IP + 2,1761	0.766	Alta
	Centro 53	0.34	6.3			

	Centro 10	(0.34) 0.12-0.48 (0.207)	(6.3) 8.1-41- 2 (22.2)	$\frac{C_u}{\sigma'_v}$ $= -0,0063IP + 0,3454$	0.3678	Media
	Fundadores 67	0.52-2.18 (1.41)	53.9- 89.6 (68.7)	$\frac{C_u}{\sigma'_v}$ $= 0,0409IP - 1,4024$	0.836	Alta
	El Bosque 39	0.48-0.78 (0.633)	14.7- 62.6 (33.3)	$\frac{C_u}{\sigma'_v}$ $= -0,0049IP + 0,7986$	0.8688	Alta
ZONA 10	San Jorge 21	1.16-1.63 (1.33)	4.9-19 (13.2)	$\frac{C_u}{\sigma'_v}$ $= 0,0132IP + 1,1552$	0.1391	Muy baja
	Sa Jorge 22	0.21-1.39 (0.58)	5.2-47 (32.2)	$\frac{C_u}{\sigma'_v}$ $= 0,0068IP + 0,3884$	0.0641	Muy baja
	La Asunción 15	0.16-0.71 (0.363)	4.9- 23.4 (12.4)	$\frac{C_u}{\sigma'_v}$ $= -0,0144IP + 0,5393$	0.2212	Baja
	La Asunción 58	1.02 (1.02)	11 (11)			
	Bavaria 16	0.16-0.6 (0.328)	5.3- 38.5 (20.6)	$\frac{C_u}{\sigma'_v}$ $= -0,0085IP + 0,5045$	0,2909	Baja
	Sáenz 30	0.38-0.69 (0.347)	16.8- 42.6 (29.7)	$\frac{C_u}{\sigma'_v}$ $= -0,012IP + 0,8888$	1	Alta
	Sáenz 51	0.47-1.91 (1.25)	11.2- 23.17 (18)	$\frac{C_u}{\sigma'_v} = 0,0768IP - 0,131$	0,494	Baja
ZONA 11	Alta Suiza 1	0.32-1.58 (1.05)	10.1- 34.9 (27)	$\frac{C_u}{\sigma'_v}$ $= -0,0262IP + 1,7586$	0.3379	Baja
	Alta Suiza 12	0.49 (0.49)	11.6 (11.6)			
	Alta Suiza 14	0.4-0.89 (0.544)	4.2-52 (24.1)	$\frac{C_u}{\sigma'_v}$ $= -0,0032IP + 0,6204$	0.1085	Muy baja
	Alta Suiza 29	0.21-0.41 (0.32)	23.5- 34 (29)	$\frac{C_u}{\sigma'_v}$ $= -0,0107IP + 0,6289$	0.3081	Baja
	Alta Suiza 41	0.35-1.75 (0.983)	16.7- 43.4 (28.3)	$\frac{C_u}{\sigma'_v}$ $= -0,0459IP + 2,2833$	0.8391	Alta
	San Rafael 6	0.61-1.15 (0,88)	15.6- 41.1 (28-3)	$\frac{C_u}{\sigma'_v}$ $= -0,0212 + 1,4845$	1	Alta
ZONA 12	Chipre 2	0.16-1.78 (0.727)	31.6- 59.4 (43.1)	$\frac{C_u}{\sigma'_v}$ $= 0,0254IP - 0,4205$	0.1447	Muy Baja
	Chipre 3	0.36-0.36 (0.36)	8.5- 32.8 (20.7)	$\frac{C_u}{\sigma'_v}$ $= 0,0001IP + 0,3578$	1	Alta
	Chipre 33	0.54-2.51 (1.56)	6.5- 19.8 (13.3)	$\frac{C_u}{\sigma'_v}$ $= -0,1496IP + 3,5514$	0.8898	Alta

Américas-Chipre	0.16-1.36 (0.565)	8.5- 45.5 (21.1)	$\frac{C_u}{\sigma'_v}$ $= -0,0113IP + 0,8035$	0.1653	Muy Baja
Chipre 49	0.21-0.87 (0.486)	3.8- 66.2 (36.5)	$\frac{C_u}{\sigma'_v}$ $= -0,0027IP + 0,5836$	0.0496	Muy baja
Chipre 55	0.29-0.69 (0.51)	17.1- 41.4 (25.7)	$\frac{C_u}{\sigma'_v}$ $= -0,0141IP + 0,8719$	0.9128	Muy Alta
Sector Los Agustinos 23	0.53-1.23 (0.836)	16.9- 27.4 (23.6)	$\frac{C_u}{\sigma'_v}$ $= -0,0051IP + 0,9577$	0.0051	Muy baja
Los Agustinos 65	0.35 (0.35)	10.2 (10.2)			
Las Américas 19	0.78-1.09 (0.91)	50.8- 55 (52.5)	$\frac{C_u}{\sigma'_v}$ $= 0,0719IP - 2,8635$	0.9982	Muy Alta
La Palma 26	0.54- 1.04 (0.753)	17- 19.9 (18.3)	$\frac{C_u}{\sigma'_v}$ $= -0,0941IP + 2,4757$	0.2973	Baja

Es sabido que la regresión lineal determina una expresión (correlación entre variables o ecuación) que minimiza la distancia entre la línea ajustada y todos los puntos de los datos. En términos simples, la regresión de mínimos cuadrados ordinarios (MCO) minimiza la suma de los residuos al cuadrado. Debe esperarse que el modelo se ajuste bien a los datos cuando las diferencias entre los valores observados y los valores de predicción del modelo son mínimas y no revelan sesgo.

El coeficiente de determinación o  $R^2$  (entendido como el porcentaje de la variación en la variable de respuesta que es explicado por un modelo lineal) es una medida estadística que enseña qué tan próximos están los datos de la línea de regresión ajustada. El dominio de valores de  $R^2$  varía de 0 a 1 o en %, entre 0 y 100. Un valor tendiente a cero revela alta dispersión de los datos y consecuentemente el modelo no explica ninguna porción de la variabilidad de los datos de respuesta en torno a su media. Contrariamente, un valor tendiente a 1 (ó a 100, según se exprese), indica muy buena correlación y refleja que el modelo explica toda la variabilidad de los datos de respuesta en torno a su media.

No obstante, el  $R^2$  no permite determinar si las estimaciones y predicciones de los coeficientes están sesgadas; esto implica la necesidad de analizar las gráficas de residuos. Pero, para esto se debe verificar el grado de certidumbre que tengan los datos de entrada. En lo que hace referencia a los datos crudos tomados en la presente investigación, no es posible

dar un juicio de valor sobre la incertidumbre y/o error en la estimación de estos; se asumen válidos, como quiera que procedan de Empresas reconocidas dedicadas a la elaboración de estudios geotécnicos que son base para la aprobación por parte de las Curadurías Urbanas y posterior construcción de proyectos de edificación.

Es decir, el  $R^2$  no señala si un modelo de regresión es adecuado; es posible tener un valor bajo del R-cuadrado para un modelo adecuado o un valor alto del  $R^2$  para un modelo que no se ajusta a los datos. Esto supone que no necesariamente los valores bajos de  $R^2$  son malos, ni que los valores altos de  $R^2$  sean buenos. Los valores bajos del  $R^2$  podrían considerarse adecuados y los valores altos de  $R^2$  podrían ser inadecuados; tal cualificación es dependiente de la naturaleza de la investigación. No siempre un  $R^2$  alto indica que el modelo tiene un buen ajuste.

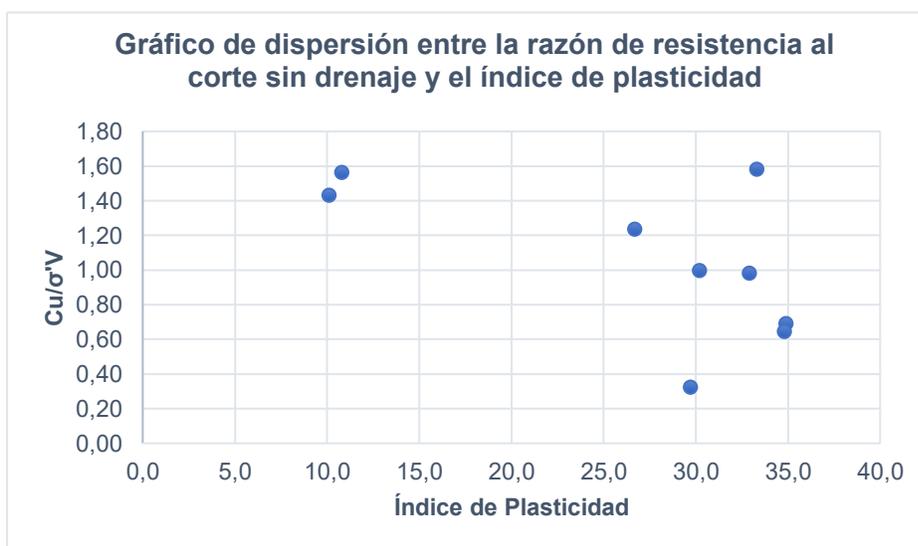
A manera de ejemplo, se analiza el comportamiento de residuos para los datos del Barrio Alta Suiza 1 de la zona 11, donde el procedimiento seguido fue (aplicando Excel):

**Paso 1:** Ingreso de los valores de los datos en las dos primeras columnas. Por ejemplo, ingrese los valores de la variable predictora (Índice de plasticidad) en A2:A11 y los valores de la variable de respuesta (razón de resistencia al corte no drenada) en B2: B11 (Tabla A4-4).

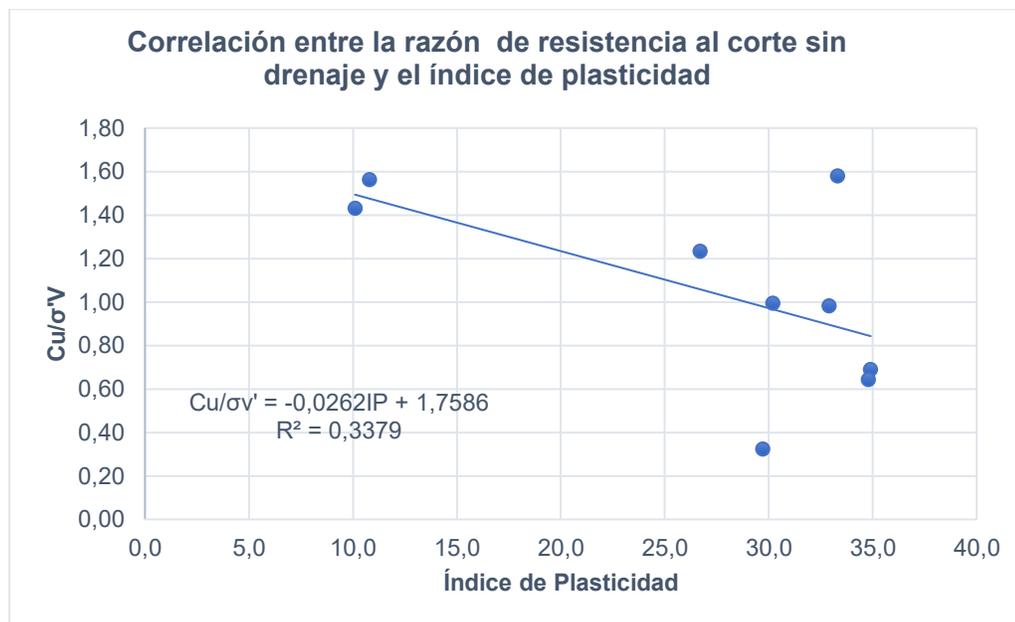
**Paso 2:** Se crea una gráfica de dispersión. Se resalta los valores en las celdas A2: B11. Luego, navegar hasta la pestaña *INSERTAR* a lo largo de la cinta superior. Hacer clic en la primera opción de *Dispersión* dentro del área de *Gráficos*. Debe aparecer la tabla (primeras dos columnas de la Tabla A4- 4) y Figura A4- 45 de dispersión de los puntos.

**Tabla A4- 4.** Variables de entrada para realizar gráfica de dispersión.

<b>1</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>
<b>2</b>	<b>IP (%)</b>	<b>C / <math>\sigma'</math></b>		
3	32,9	0,98		
4	10,8	1,56		
5	33,3	1,58		
6	34,9	0,69		
7	30,2	0,99		
8	34,8	0,64		
9	29,7	0,32		
10	26,7	1,23		
11	10,1	1,43		

**Figura A4- 45.** Gráfico de dispersión entre la razón de resistencia al corte sin drenaje y el Índice de Plasticidad para el barrio Alta suiza – 1 de la zona 11.

**Paso 3:** Muestre la ecuación de la línea de tendencia en el diagrama de dispersión. Haciendo clic en «Agregar elementos de gráfico» en la pestaña *DISEÑO*, luego en «Línea de tendencia» y luego en «Más opción de línea de tendencia». Dejar «Lineal» seleccionado y marcar «Mostrar ecuación en gráfico». Cerrar el panel «Formato de línea de tendencia». La ecuación de la línea de tendencia ahora se mostrará en el diagrama de dispersión (Figura A4- 46).



**Figura A4- 46.** Correlación entre la razón de resistencia al corte sin drenaje y el Índice de Plasticidad para el barrio Alta suiza – 1 de la zona 11.

**Paso 4:** Calcule los valores predichos. Ingrese la ecuación de la línea de tendencia  $\frac{C_u}{\sigma'_{v}} = -0.0262IP + 1,7586$  en la celda C2, donde IP es A2:A11 (Tabla A4- 5). Luego, haga clic en la celda C2 y haga doble clic en el pequeño «Controlador de relleno» en la parte inferior derecha de la celda. Se copiará la fórmula en la celda C2 al resto de las celdas de la columna

**Tabla A4- 5.** Ecuación lineal de la línea de tendencia.

1	A	B	C	D
2	IP (%)	C / $\sigma'$	Ecuación Lineal	
3	32,9	0,98	0,89662	
4	10,8	1,56	1,47564	
5	33,3	1,58	0,88614	
6	34,9	0,69	0,84422	
7	30,2	0,99	0,96736	
8	34,8	0,64	0,84684	
9	29,7	0,32	0,98046	
10	26,7	1,23	1,05906	
11	10,1	1,43	1,49398	

**Paso 5:** Cálculo de los residuos. Ingrese B2-C2 en la celda D2. Luego, haga clic en la celda D2 y haga doble clic en el pequeño «Controlador de relleno» en la parte inferior derecha de

la celda. Esto copiará la fórmula en la celda D2 al resto de las celdas de la columna (Tabla A4- 6).

**Tabla A4- 6.** Residuo obtenido para cada punto evaluado.

1	A	B	C	D
2	IP (%)	C / $\sigma'$	Ecuación Lineal	Residuo
3	32,9	0,98	0,89662	0,08
4	10,8	1,56	1,47564	0,09
5	33,3	1,58	0,88614	0,69
6	34,9	0,69	0,84422	-0,16
7	30,2	0,99	0,96736	0,03
8	34,8	0,64	0,84684	-0,20
9	29,7	0,32	0,98046	-0,66
10	26,7	1,23	1,05906	0,18
11	10,1	1,43	1,49398	-0,06

**Paso 6:** Crear el gráfico de residuos. Resaltar las celdas A2: A11. Mantener presionada la tecla «Ctrl» y resalte las celdas D2: D11. Luego, navegar hasta la pestaña *INSERTAR* a lo largo de la cinta superior. Hacer clic en la primera opción de *Dispersión* dentro del área de *Gráficos*. La Figura A4- 47 muestra la gráfica residual. El eje x muestra los valores ajustados y el eje y muestra los residuos. Los puntos con formato de etiqueta de datos se consideran atípicos



**Figura A4- 47.** Gráfica de residuos.